

# **Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich**

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der  
Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **Dissertation**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Björn Filzek  
aus Niedernhausen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. B. Breuer
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Landau
Tag der Einreichung:	28.01.2002
Tag der mündlichen Prüfung:	30.04.2002

Darmstadt 2002



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand aus meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (*fzd*) an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bert Breuer, dem ehemaligen Leiter des Fachgebiets, für das Vertrauen, das er mir mit der Übertragung dieser interessanten Aufgabe und in der gewährten Selbständigkeit entgegengebracht hat. Über die fachliche Unterstützung hinaus habe ich ihm vieles zu verdanken, was mich auch nach meiner wissenschaftlichen Tätigkeit auf meinem weiteren Lebensweg begleiten wird. Herrn Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau danke ich herzlich für die fachliche Begleitung während des Forschungsprojekts und für die freundliche Übernahme des Koreferats.

Allen meinen Kolleginnen und Kollegen in Werkstätten und Büros bin ich für die freundschaftliche Atmosphäre sehr dankbar. Insbesondere in schwierigen Zeiten konnte ich mir ihrer Unterstützung in jeglicher Form stets gewiss sein. Ein großer Teil dieser Arbeit geht auf die engagierte Mithilfe von zahlreichen Studentinnen und Studenten zurück, die in Studien- und Diplomarbeiten sowie als wissenschaftliche Hilfskräfte nicht nur in erfreulicher Weise ihren unverzichtbaren Beitrag leisteten, sondern mich auch sehr viel gelehrt haben.

Meiner langjährigen Mitstreiterin, Frau Dipl.-Wirtsch.-Ing. Bettina Abendroth, bin ich für die angenehme Zusammenarbeit sehr verbunden, deren interdisziplinärer Charakter sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Maßgeblicher Dank gebührt der BMW AG, die mit ihrer finanziellen, materiellen und fachlichen Unterstützung die Voraussetzungen für meine wissenschaftliche Tätigkeit geschaffen hat. Es sei auch allen Personen gedankt, die als Versuchsfahrer an den Untersuchungen mitgewirkt haben.

Katja danke ich sehr für ihr Verständnis und ihre Geduld. Letztlich bin ich meinen Eltern und meinem Bruder zutiefst dankbar, ohne die ich nicht an diesem Punkt stünde, der mich mit Freude auf die zurückliegende Zeit blicken lässt.

Niedernhausen, im Januar 2002

Björn Filzek



## Inhalt

1	Begriffe und Definitionen .....	1
2	Problemstellung .....	2
2.1	Motivation .....	2
2.2	Stand der Forschung .....	4
2.2.1	Abstandsverhalten .....	4
2.2.2	Vorschriften zur Abstandshaltung .....	12
2.2.3	Abstandsregelungssysteme .....	13
2.2.4	Methoden zur Erforschung der Aktiven Sicherheit .....	19
2.3	Fazit .....	25
2.4	Zielsetzung .....	27
3	Methodik .....	28
3.1	Versuchskonzept .....	28
3.1.1	Versuchsstrecke .....	29
3.1.2	Probandenkollektiv .....	30
3.1.3	Versuchsfahrzeuge .....	31
3.1.4	Messkonzept .....	32
3.2	Auswertung .....	36
3.2.1	Situationsklassifikation .....	36
3.2.2	Datenaufbereitung .....	39
3.2.3	Verhaltensmodellierung .....	41
3.2.4	Sicherheitsanalyse .....	43
3.3	Fazit .....	46
4	Ergebnisse .....	47
4.1	Bedeutung der Situationen .....	47
4.2	Fahrerverhalten .....	50
4.2.1	Folgefahrt .....	50
4.2.2	Einscheren .....	55
4.2.3	Annäherung .....	65
4.3	ACC-Verhalten .....	67
4.3.1	Folgefahrt .....	67
4.3.2	Einscheren .....	69
4.4	Situativer Vergleich von Fahrer und ACC .....	72
4.4.1	Folgefahrt .....	72
4.4.2	Einscheren .....	73
4.5	Sicherheit bei ACC-Unterstützung .....	78

4.6	Fazit.....	82
5	Diskussion.....	84
5.1	Beurteilung der Methodik.....	84
5.1.1	Versuchsstrecke .....	84
5.1.2	Probanden .....	85
5.1.3	Versuchsfahrzeuge.....	85
5.2	Relevanz der Fahrermodelle.....	87
5.2.1	Güte der Modellergebnisse .....	87
5.2.2	Einschränkungen der Gültigkeit.....	95
5.2.3	Anwendung der Fahrermodelle.....	97
5.3	Betrachtungen zur Sicherheit .....	98
5.4	Fazit.....	101
6	Zusammenfassung.....	102
7	Anhang.....	103
8	Literatur.....	104

## Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

### Abkürzungen

Abs.	Absatz
ACC	Adaptive Cruise Control
cm	Zentimeter
d.h.	das heisst
G	Giga
Glg.	Gleichung
h	Stunde
Hz	Hertz
Kap	Kapitel
kg	Kilogramm
km	Kilometer
kW	Kilowatt
Lkw	Lastkraftwagen
m	Meter
min	Minuten
Pkw	Personenkraftwagen
s	Sekunden
s.	siehe

### Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	$[m/s^2]$	Beschleunigung
A	$[-]$	Ausgangsgröße (allgemein)
c	$[m]$	Breite eines Fahrzeugs
d	$[m]$	Abstand
E	$[-]$	Eingangsgröße (allgemein)
l	$[-]$	freier Parameter

m	[-]	freier Parameter
N	[-]	Gesamtanzahl
P	[-]	Schätzparameter
$R^2$	[-]	Bestimmtheitsmaß
s	[m]	Weg
t	[s]	Zeit
ttc	[s]	Time-to-collision
v	[km/h]	Geschwindigkeit
$\Delta v$	[km/h]	Relativgeschwindigkeit
$\alpha$	[°]	Bildgröße als Winkelmaß im Auge
$\lambda$	[-]	menschlicher Sensitivitätsfaktor
$\rho$	[fzg/km]	Fahrzeugdichte
$\sigma$	[variabel]	Standardabweichung

### Indizes

an	Annäherung
ein	Einscheren
folg	Folgefahrt
i	Versuchsfahrzeug
i-1	vorausfahrendes Fahrzeug
i-2	vorvorausfahrendes Fahrzeug
mess	gemessen
min	minimal
mod	modelliert
r	Reaktion
z	Zeitlücke
0	Verzögerungsbeginn



## 1 Begriffe und Definitionen

Zum Zweck einer eindeutigen Ausdrucksweise werden die Beziehungen zwischen den Verkehrsteilnehmern mit einheitlichen Begriffen beschrieben. Die Vorgänge im Verkehr werden aus der Perspektive des Versuchsfahrzeugs beschrieben und ergeben sich damit größtenteils aus dem Begriff selbst. Die Definitionen, die mit der Verwendung des Begriffs verknüpft sind, werden in diesem Kapitel erläutert.

### Annäherung

Annähern an ein langsames Fahrzeug, das in der eigenen Spur vorausfährt.

### Ausscheren

Das Fahrzeug, das in der eigenen Spur direkt vorausfährt, wechselt in eine benachbarte Spur.

### Einscheren

Ein vorausfahrendes Fahrzeug wechselt in die eigene Spur, ohne dass sich danach ein weiteres Fahrzeug dazwischen befindet.

### Folgefahrt

Es liegt gebundene Fahrt im eingeschwungenen Zustand vor, d.h. es wird einem vorausfahrenden Fahrzeug bei annähernd gleicher Geschwindigkeit und relativ konstantem Abstand gefolgt.

### Freie Fahrt

Die Geschwindigkeit kann frei gewählt werden, da kein Fahrzeug in der eigenen Spur vorausfährt. Tempolimits, Kurven oder andere Beschränkungen spielen keine Rolle.

### Gebundene Fahrt

In der eigenen Spur fährt ein Fahrzeug voraus, so dass die Wahl der eigenen Geschwindigkeit bzw. Spur beeinflusst wird.

### Kolonnenfahrt

Spezialfall der Folgefahrt, bei dem mindestens zwei anderen Fahrzeugen gefolgt wird, die beide in der eigenen Spur vorausfahren.

### Potentiell Objekt

Fahrzeug, das mit der größten Wahrscheinlichkeit das nächste Zielobjekt (s. unten) werden könnte, auf das dann Abstand und Geschwindigkeit geregelt werden müssten.

### Relativgeschwindigkeit

Differenz der Geschwindigkeiten von vorausfahrendem und eigenem Fahrzeug bzw. zeitliche Ableitung des Abstandes. Eine negative Relativgeschwindigkeit bedeutet demnach, dass das vorausfahrende Fahrzeug langsamer ist.

### Spurwechsel

Das Versuchsfahrzeug selbst wechselt seine Spur.

### Zielobjekt

Fahrzeug, das in der eigenen Spur direkt vorausfährt und auf das Abstand und Geschwindigkeit geregelt werden.

### Zurückfallen

Fahrt hinter einem in der eigenen Spur direkt vorausfahrenden Fahrzeug, das sich mit höherer Geschwindigkeit entfernt.

## **2 Problemstellung**

### **2.1 Motivation**

Die Sicherheit im Straßenverkehr zu verbessern, ist seit jeher ein Ziel der Fahrzeugentwickler. Die Anforderungen wuchsen mit steigenden Geschwindigkeiten und zunehmendem Verkehrsaufkommen drastisch an. Verbesserungen wurden zunächst insbesondere auf dem Gebiet der Passiven Sicherheit erzielt [67]. Entwicklungen wie Airbag, Gurtstraffer, energieabsorbierende Karosseriestrukturen und steifere Fahrgastzellen führten entgegen dem Entwicklungstrend von Verkehrsleistung und Unfallzahlen zu einer Abnahme von Verletzten und Verkehrstoten [79]. Dieser Zusammenhang offenbart jedoch auch, welche Verbesserungspotentiale sich noch aus der Vermeidung von Unfällen ergeben.

Fortschritte in der Sensorentwicklung und deutliche Leistungssteigerungen in der Signalverarbeitung [110] eröffnen heute neue Möglichkeiten, den Fahrer auf dem Gebiet der Aktiven Sicherheit maßgeblich zu unterstützen [17]. Die Technik soll die herausragenden Fähigkeiten des Fahrers in Bezug auf Wahrnehmungsleistung und Flexibilität nutzen, und dabei die menschlichen Schwächen hinsichtlich Präzision und Schnelligkeit der Reaktion kompensieren [32]. Das Ergebnis sind komplexe technische Systeme wie Antiblockierbremsystem und Fahrdynamikregelung, die vorwiegend im Hintergrund arbeiten. Eingriffe der genannten Beispiele treten nur in Notsituationen und damit entsprechend selten auf und erfolgen automatisiert ohne die direkte Mitwirkung des Fahrers, der über den Einsatz lediglich optisch, akustisch oder auch haptisch informiert wird.

Während solche stabilisierenden Systeme ihre Wirksamkeit bereits unter Beweis stellen konnten, ist mit dem Adaptive Cruise Control (ACC) inzwischen ein neuartiges System auf dem Markt, das mit der Regelung von Geschwindigkeit und Abstand zu vorausfahrenden und einsicherenden Fahrzeugen auch Führungsaufgaben des Fahrers übernimmt. In diesem Fall initiiert der Fahrer den Einsatz des Systems bewusst, indem er Teilaufgaben an das ACC delegiert und selbst diesbezüglich nur noch die Kontrolle ausübt. Das Ziel ist es, den Fahrer angesichts der zunehmenden Komplexität der Fahraufgaben von seiner Tätigkeit zu entlasten [84]. Neben der Entlastung von herkömmlichen Aufgaben kommen jedoch auch neue

Belastungen aus der Bedienung des ACC und der Überwachung seiner Funktion hinzu. Im Falle einer positiven Bilanz stellt sich die Frage, inwieweit der Gewinn an Sicherheit durch Anpassungen im Geschwindigkeits- und Abstandsverhalten kompensiert wird. Die technischen Leistungsgrenzen des Fahrzeugs sollen schließlich voll nutzbar sein, ohne zugleich die Risikobereitschaft des Fahrers bis zum ständigen Ausschöpfen der Reserven heraufzusetzen [106].

Abstandsregelungen der ersten Generation bieten eine Funktionalität, die die individuellen Wünsche des Fahrers in Form einer weitestgehend frei wählbaren Geschwindigkeit und eines einstellbaren Folgeabstandes berücksichtigt. Im Hinblick auf die Vielfalt potentieller Verkehrssituationen, die entscheidend von den wechselseitigen Beziehungen zu anderen Verkehrsteilnehmer bestimmt werden, weisen Abstandsregelungssysteme dagegen noch eine geringe Flexibilität auf [65].

Der Erfolg von ACC-Systemen bemisst sich an den Chancen und Risiken, die ihr Einsatz mit sich bringt. Die Gestaltung der Systemeigenschaften und –grenzen bietet dazu die Möglichkeit, direkt und über teach-back-Effekte Einfluss auf das Verkehrsverhalten zu nehmen. Zur Auslegung von ACC spannen menschliche Anforderungen, technische Realisierbarkeit, aber auch juristische Beschränkungen und alltägliche Verkehrsbedingungen den Rahmen auf. In diesem Wechselfeld der Beziehungen kommt den Kriterien Akzeptanz und Sicherheit die eigentliche Bedeutung zu, wobei das Zusammenspiel von Fahrer und ACC die Schlüsselrolle spielt. Daran definieren sich sowohl der Nutzen von ACC als auch potentielle negative Auswirkungen infolge der neuartigen Aufgabenteilung zwischen Fahrer und technischem System.

Das Thema dieser Arbeit sind die Beurteilung und Verbesserung von Akzeptanz und Sicherheit beim Einsatz von ACC. Die Vorgehensweise basiert auf einem Vergleich des Abstandsverhaltens, das Fahrer und ACC jeweils an den Tag legen. Eine Übersicht über den Wissensstand zum Abstandsverhalten der Fahrer liefert zunächst die Grundlage, auf der sich ein zu modellierendes Normverhalten aufbauen lässt. Eine Darstellung der gesetzlichen Vorschriften steckt den Rahmen ab, in dem sich Fahrer und ACC-Entwickler bewegen. Nach der Vorstellung der Technik und der Untersuchungsergebnisse zu Abstandsregelungssystemen werden Methoden erläutert, die zur Analyse der Sicherheit herangezogen werden können. Aus der Summe der aus der Literatur recherchierten Erkenntnisse leiten sich abschließend die konkreten Ziele dieser Arbeit ab.

## 2.2 Stand der Forschung

### 2.2.1 Abstandsverhalten

Die Bewegung eines Kraftfahrzeugs ist im Wesentlichen durch zwei translatorische Freiheitsgrade gekennzeichnet, der Bewegung in Fahrtrichtung und quer dazu. Die zugrunde liegende Fahrtätigkeit umfasst Navigations-, Führungs- und Stabilisierungsaufgaben. Nach [59] beschränkt sich die Stabilisierung weitestgehend auf die normale Spurhaltung in vorgegebenen Fahrbahnen und auf die Abstandshaltung bei Kolonnenfahrt. Wird die Längsführung bei niedrigen Verkehrsdichten noch durch die Geschwindigkeitswahl dominiert, so kommt mit zunehmendem Verkehr der Kollisionsvermeidung und damit der geeigneten Wahl der Abstände eine steigende Bedeutung zu. Dabei kann die Abstandshaltung mitunter in enger Beziehung zum Lenkverhalten stehen, wie sich beispielsweise für die Einleitung eines Überholvorganges leicht nachvollziehen lässt.

Die Fahrzeugführung ist eine Steuerungstätigkeit mit kontinuierlicher Informationsverarbeitung [90]. Die meisten benötigten Informationen werden aus der Außensicht abgeleitet [59], während zur Stabilisierung auch kinästhetische, haptische und akustische Informationskanäle herangezogen werden [93]. Damit spielen die menschlichen Leistungen der Wahrnehmung und Informationsverarbeitung eine wichtige Rolle. Fähigkeiten und Grenzen des Menschen orientieren sich an seinen anatomischen Eigenschaften, physiologischen Funktionen, psychischen Prozessen und seiner subjektiven Wertbildung [85].

Gerade diese Vielfalt an Einflussfaktoren bedeutet Herausforderung und Schwierigkeit zugleich. Seit den 50er Jahren gibt es Bestrebungen, den Fahrzeugfolgeprozess zu beschreiben. Zahlreiche Modelle unterschiedlichster Modellierungstiefen tragen der Tatsache Rechnung, dass ein Modell immer eine Beschränkung auf die Erscheinungen der Wirklichkeit darstellt, die zur Untersuchung einer Fragestellung berücksichtigt werden müssen. Eine entscheidende Rolle spielt der angemessene Umfang der einzubeziehenden Größen, mit dem das gewünschte Ziel erreicht werden soll. Den unterschiedlichen Zielsetzungen folgend lässt sich die Beschreibung dynamischer Vorgänge im Längsverkehr in makroskopische und mikroskopische Modelle aufteilen [70], wobei die Grenzen in Abhängigkeit von den berücksichtigten Größen fließend sind.

Makroskopische Modelle betrachten den Verkehr als Menge von Fahrzeugen. Aus der Kontinuumstheorie abgeleitete zeitdiskrete Differentialgleichungen beschreiben die typischen Kenngrößen des Verkehrs wie die gemittelte Geschwindigkeit des Verkehrsstroms, die Verkehrsdichte und den Verkehrsfluss, der auch als Verkehrsstärke bezeichnet wird [18]. Makroskopische Modelle werden typischerweise in der Simulation zur Bestimmung von Streckenauslastungen und Verkehrsprognosen sowie zur Überwachung und Regelung des Verkehrs eingesetzt [30]. In [64] wird ein umfassender Überblick über existierende Verkehrssimulationssysteme gegeben.

Mikroskopische Modelle bilden die Zustandsgrößen der einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ab. Dem Fahrer kommt eine entscheidende Bedeutung zu, da er die Bewegungsabläufe maßgeblich bestimmt. Eine gekoppelte Betrachtung mehrerer Fahrer-Fahrzeug-Einheiten erlaubt auch hier die Analyse des Verkehrsablaufes. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Interaktion einzelner Verkehrsteilnehmer und ihrer lokalen Verteilung.

Eine Mischform aus makroskopischen und mikroskopischen Modellen ist als mesoskopische Simulation bekannt [103]. Sie basiert ebenfalls auf der Kontinuumstheorie, betrachtet jedoch zusätzlich Einzelfahrzeuge anhand makroskopischer Zustandsgrößen.

Submikroskopische Modelle sind durch eine höhere Modellierungstiefe gekennzeichnet. Dies bezieht sich derzeit noch in erster Linie auf das Fahrzeug, dessen Eigenschaften genauer abgebildet werden [107]. Es ist jedoch auch eine detailliertere Beschreibung des Fahrerverhaltens denkbar und zur Beschreibung kausaler Zusammenhänge unumgänglich [108].

Fahrermodelle sind den mikroskopischen bzw. submikroskopischen Modellen zuzuordnen, auf deren historische Entwicklung im Folgenden näher eingegangen wird.

Als Ursprung der Fahrzeugfolgetheorie findet sich in der Literatur vielfach die Grundgleichung

$$\text{REAKTION} = \text{EMPFINDLICHKEIT} \times \text{REIZ}$$

Erste Ansätze sahen noch die Geschwindigkeit als Maß für die Reaktion, was sich jedoch schon bald als unrealistisch erwies. Es folgten zahlreiche auf der Beschleunigung basierende Ansätze, die in [45] in einer allgemeinen Form zusammengefasst wurden.

$$a_i(t + t_r) = \lambda \cdot (v_i(t + t_r))^m \cdot \frac{v_{i-1}(t) - v_i(t)}{d(t)^l} \quad (1)$$

Dem Modell liegt die Vorstellung zugrunde, dass die Relativgeschwindigkeit einen Reiz auf den Fahrer ausübt und er mit einer Beschleunigung darauf reagiert, d.h. das Regelziel ist eine verschwindende Relativgeschwindigkeit. Die Empfindlichkeit ist der Eigengeschwindigkeit direkt und dem Abstand umgekehrt proportional und enthält einen menschlichen Sensitivitätsfaktor, der von Fahrer zu Fahrer stark schwankt und schwierig zu bestimmen ist. Abstand und Relativgeschwindigkeit werden mit einer Reaktionszeit wahrgenommen, die vom Abstand und der Verzögerung des Vorfahrenden abhängt.

Unabhängig, ob amerikanischen oder europäischen Ursprungs, lassen sich die meisten bekannten Fahrzeugfolgemodelle auf diese Gleichung zurückführen und unterscheiden sich lediglich in der Wahl der Exponenten  $m$  und  $l$ . Sie wurden ausschließlich zur Beschreibung des Folgefahrens auf einspurigen Straßen ohne Überholen entworfen. Das Ziel war die Untersuchung zweier eher makroskopischer Phänomene, das der Stabilität und das des quasi-stationären Verkehrsflusses.

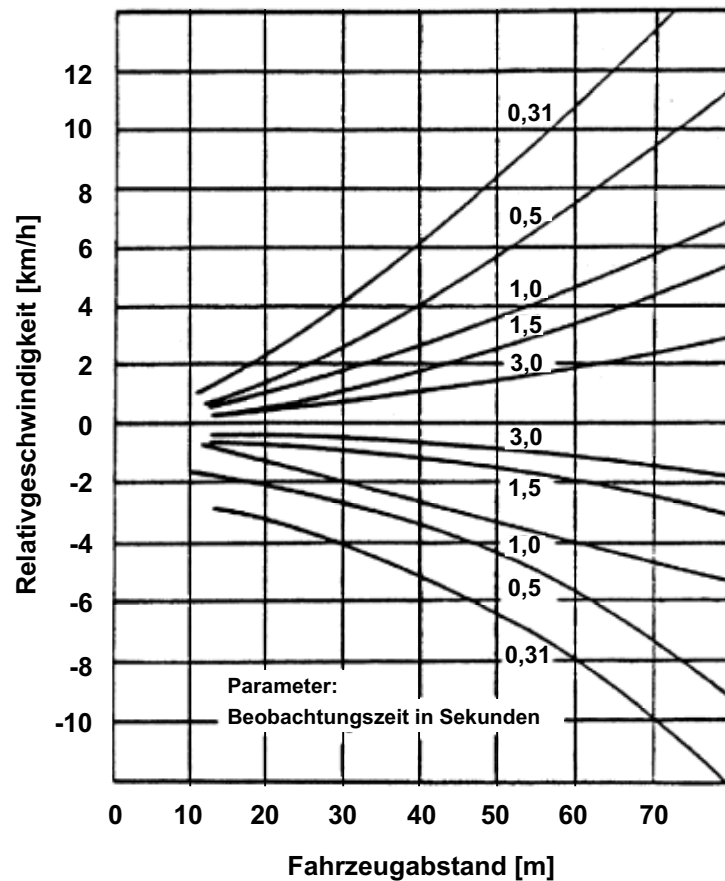
Noch in den sechziger Jahren erweiterte [70] den Zusammenhang auf theoretischer Ebene für mehrere vorausfahrende Fahrzeuge, obwohl der Einfluss des vorvorausfahrenden Fahrzeugs (i-2) zur damaligen Zeit noch als unbedeutend angesehen wurde. Einige Jahre später konnte [26] diese Abhängigkeit lediglich vermuten. Anfang der Neunziger tauchte der Gedanke in [22] erneut auf, wonach insbesondere im Stadtverkehr geringe Abstände nur deshalb gefahrlos einzuhalten sind, da auf die Bremsleuchten des vorvorausfahrenden Fahrzeugs (i-2) reagiert wird. Kurze Zeit später kam [29] am Simulator zu dem Ergebnis, dass der Fahrer (i) bei Kolonnenfahrt auf der Autobahn auf die Beschleunigung des vorvorausfahrenden Fahrzeugs (i-2) reagiert. Durch diese Vorausschau verminderte sich zwar die Reaktionsdauer, der Zugewinn an Verkehrssicherheit wurde jedoch durch verkürzte Abstände wieder kompensiert.

In der Originalquelle der Gleichung 1 wird bereits auf die Schwierigkeit hingewiesen, das weitgehend auf theoretischen Überlegungen basierende Modell experimentell zu validieren. Untersuchungen sind schwierig und mit großem Zeitaufwand durchzuführen und konnten nur bei idealisierten Bedingungen erfolgen. Erste Untersuchungen gehen auf ein 1957 bei General Motors entwickeltes System zurück, das ähnlich einem Fadenpotentiometer mit einem am vorausfahrenden Fahrzeug befestigten Drahtseil funktionierte [28]. Im Laufe der Jahre folgten verschiedene sowohl strecken- als auch fahrzeugbezogene optische Verfahren [16], die manuell ausgewertet werden mussten, bis Messungen auf Basis von Radar und Lidar die Arbeit deutlich erleichterten.

[53] kalibrierte das allgemeine Modell von [45] in Gleichung 1 für europäische Verhältnisse anhand von Messungen im fließenden Verkehr. Die Folgefahrten wurden nach Fällen unterschieden, ob der Abstand zu- oder abnahm und die Bremslichter des vorausfahrenden Fahrzeugs aufleuchteten. Man ermittelte fallspezifische Werte für  $m$  und  $l$  in den Bereichen  $0,2 < m < 0,4$  und  $0,5 < l < 2,5$ . Die Reaktionszeiten lagen im Bereich zwischen 0,5 und 2,0 Sekunden.

Gleichung 1 basiert wie bereits erwähnt auf der Annahme, dass Reaktionen infolge eines Reizes erfolgen. Demnach ergibt sich ohne Reiz, d.h. bei ausgeglichener Relativgeschwindigkeit, die Beschleunigung zu Null, so dass sich der Abstand ohne äußere Störungen nicht mehr ändern dürfte. [99] fand dagegen heraus, dass die Fahrer bei der Folgefahrt üblicherweise keine konstanten Abstände einhalten und führte ein Aktionspunktmodell in die Verkehrssimulation ein. Ein Aktionspunkt bezeichnete die Überschreitung von gewissen Schwellwerten, die bestimmte Aktionen nach sich ziehen. Für die Folgefahrt wurde aufgezeigt, dass die Fahrzeugbeschleunigung erst geändert wird, wenn die Relativgeschwindigkeit bestimmte Schwellwerte übersteigt, die vom Abstand und der Beobachtungsdauer abhängen (**Bild 2.1**). Demnach pendeln die Fahrer zwischen diesen Schwellwerten hin und her, wobei sich der Abstand bei länger andauernden Folgevorgängen allmählich vergrößert. Als Erklärung dient auch hier eine Differenzierung nach zunehmenden und abnehmenden Abständen, da die Wahrnehmungsschwelle für negative Relativgeschwindigkeiten bzw. abnehmende Abstände niedriger liegt. Psychologisch wird dieser Zusammenhang mit erhöhter Aufmerksamkeit und

Reaktionsbereitschaft bei abnehmenden Abständen erklärt [105]. Für deutsche Autobahnen geht [53] davon aus, dass bei Abständen größer als 150 Meter kein Einfluss der Relativgeschwindigkeit mehr feststellbar ist.



**Bild 2.1:** Schwellwerte bei der Wahrnehmung von Relativgeschwindigkeiten [99]

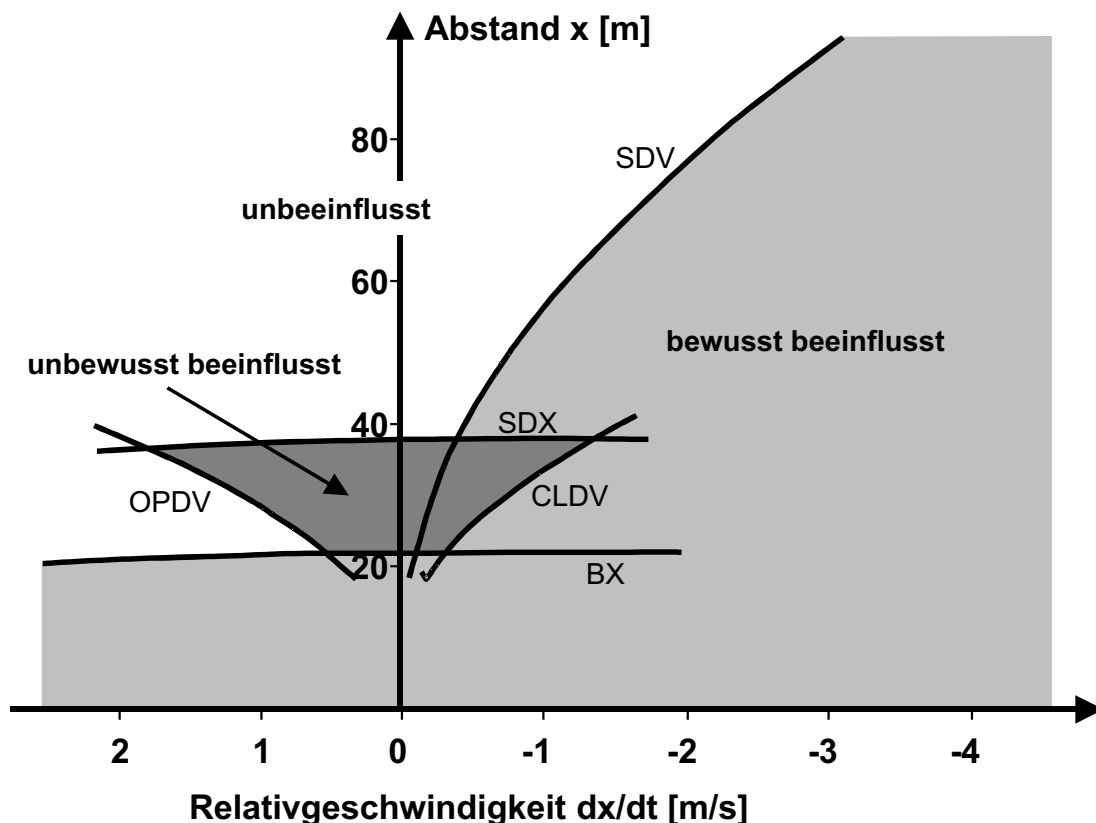
Untersuchungen von [76] bei höheren Relativgeschwindigkeiten ergaben ebenfalls, dass die Wahrnehmungsschwellen, oberhalb derer der Mensch Abstandsänderungen wahrnehmen kann, vom Abstand und der Relativgeschwindigkeit abhängen und von Fahrer zu Fahrer variieren. Bei Folgefahrten liegen die Differenzgeschwindigkeiten jedoch auch häufig unter den Schwellwerten, so dass die Abstände periodisch mit niedriger Frequenz in gewissen Grenzen schwingen. Dies ist auf die eingeschränkte Fähigkeit des Menschen zurückzuführen, Abstände einzuschätzen. Nach [49] werden Abstände geschätzt, indem einem beobachteten Objekt ein Abstand zugeordnet wird, in welchem ein Objekt der angenommenen Größe erfahrungsgemäß anzuordnen wäre.

[105] stellte den Zusammenhang zwischen den Erkenntnissen zur menschlichen Wahrnehmung von Relativgeschwindigkeiten und der in Gleichung 1 niedergelegten Fahrzeugfolgetheorie her. Er leitete ab, dass die Änderung der Bildgröße, die über die Winkelverhältnisse direkt von der Größe und der Entfernung des beobachteten Objekts abhängt, für die Relativbewegung den entscheidenden Reiz darstellt.

$$\frac{d\alpha}{dt} = c \cdot \frac{\Delta v}{d^2} \quad (2)$$

Die zeitliche Änderung des Winkels entspricht demnach aber der rechten Seite von Gleichung 1, wenn man in Anlehnung an [53] (s. oben)  $m=0$  und  $l=2$  wählt. Damit ist die Beschleunigung bei Folgefahrt der Winkeländerung im Auge proportional, die jedoch erst ab gewissen Schwellwerten wahrgenommen werden kann. Dabei wird die Größe des vorausfahrenden Fahrzeugs (i-1) als neuer Parameter mitberücksichtigt. Ferner wurde aus diesen Überlegungen gefolgert, dass das vorvorausfahrende Fahrzeug (i-2) den Fahrer (i) in erster Linie durch seine Bremsleuchten beeinflusst, da dessen Relativgeschwindigkeit aufgrund des etwa doppelt so großen Abstandes viel später erkannt wird als die Relativgeschwindigkeit des direkt vorausfahrenden Fahrzeugs (i-1).

Auf diesen Erkenntnissen baute [105] ein wahrnehmungsbasiertes Modell auf (**Bild 2.2**). Es berücksichtigte zusätzlich die Abweichungen vom Wunschabstand dahingehend, dass sie erst ab gewissen Toleranzwerten zu Aktionen führen. Die bis 1974 bekannten mikroskopischen Modelle konzentrierten sich auf den Bewegungsablauf einer Fahrer-Fahrzeug-Einheit, beschränkten sich jedoch schlicht auf das Vorhandensein von anderen Verkehrsteilnehmern. [105] führte eine differenziertere Betrachtung der Wechselwirkungen ein und definierte die Situationen unbeeinflusstes (freie Fahrt), bewusst beeinflusstes (Annäherung) und unbewusst beeinflusstes Fahren (Folgefahrt).



**Bild 2.2:** Modell der Wahrnehmungsschwellen und Situationsabgrenzung nach [105]



Die Abgrenzung der Situationen erfolgt im Einzelnen durch die Wahrnehmungsschwellen:

BX: gewünschter minimaler Folgeabstand

SDX: akzeptierter maximaler Folgeabstand

CLDV: Wahrnehmungsschwelle für kleinste Relativgeschwindigkeiten bei kleinen, abnehmenden Abständen

OPDV: Wahrnehmungsschwelle für kleinste Relativgeschwindigkeiten bei kleinen, zunehmenden Abständen

SDV: Wahrnehmungsschwelle für Relativgeschwindigkeiten bei relativ großen Abständen

Die Modellierung erfolgte situationsspezifisch, wobei die Handlungsalternativen und die individuellen Unterschiede hinsichtlich Sicherheitsbedürfnis und Schätzvermögen der Fahrer in Form von stochastischen Verteilungen Berücksichtigung fanden.

[111] erweiterte das Aktionspunktmodell von [99]. Aktionsschwellwerte hängen demnach von der Zeitdauer der Beobachtung des vorausfahrenden Fahrzeugs ab. Die Aufmerksamkeit der Fahrer wird in Form von Häufigkeit und Dauer der Blickabwendungen in das Modell übernommen. Die Beschleunigung ändert sich an den Aktionspunkten nahezu sprunghaft in Abhängigkeit von Fahrer, Relativgeschwindigkeit und Relativbeschleunigung und wird bis zum nächsten Aktionspunkt beibehalten. Das Modell wurde zur Simulation des Kolonnenverkehrs genutzt, um Aussagen zur Kolonnenstabilität sowie zu erzielbaren Verkehrsdichten und Verkehrsstärken im Vergleich von Fahrer und ACC abzuleiten.

Die bisher behandelten Modelle zielten ausnahmslos auf eine Beschreibung der Beschleunigung ab. Das Beschleunigungsverhalten des Fahrers ist jedoch auf einen der Situation angepassten Abstand ausgerichtet [12], der zur Beschreibung des Fahrerverhaltens auch direkt modelliert werden kann. Dazu lässt sich der Abstand als eine Überlagerung aus Mittelwert und Schwankung auffassen [49]. Schwankungen im Abstand lassen sich nach den bisherigen Erkenntnissen vorwiegend auf Unzulänglichkeiten in der menschlichen Informationsaufnahme zurückführen und sind unter regelungstechnischen Aspekten insbesondere hinsichtlich der Stabilität von großem Interesse. Die Abstandsmittelwerte dagegen können als eine Art Sollgröße verstanden werden, die Aussagen zur Abhängigkeit des gewünschten Verhaltens von äußeren Parametern wie z.B. der Situation liefern soll.

Die am häufigsten in der Literatur anzutreffende Einflussgröße auf den Abstand bei Folgefahrt ist die Fahrgeschwindigkeit [2,53,70,96]. [49] gibt eine Übersicht über zahlreiche Ansätze, die den Abstand als proportional zur Geschwindigkeit angeben. Die Proportionalitätsfaktoren, allgemein Zeitlücken genannt, schwanken allgemein von einer bis zu sechs Sekunden. Dabei ist davon auszugehen, dass auf zweispurigen Straßen auf der linken Spur kleinere Werte anzutreffen sind als auf der rechten Spur [21].

Die Meinungen hinsichtlich der Abhängigkeit von Abstand und Fahrgeschwindigkeit gehen jedoch auseinander. So geht [105] beispielsweise davon aus, dass bei höheren

Geschwindigkeiten mit riskanteren Abständen gefahren wird und bezeichnet den Folgeabstand als proportional zur Wurzel der Fahrgeschwindigkeit:

$$d = 2 + 4,5 \cdot \sqrt{v_i / 3,6} \quad (3)$$

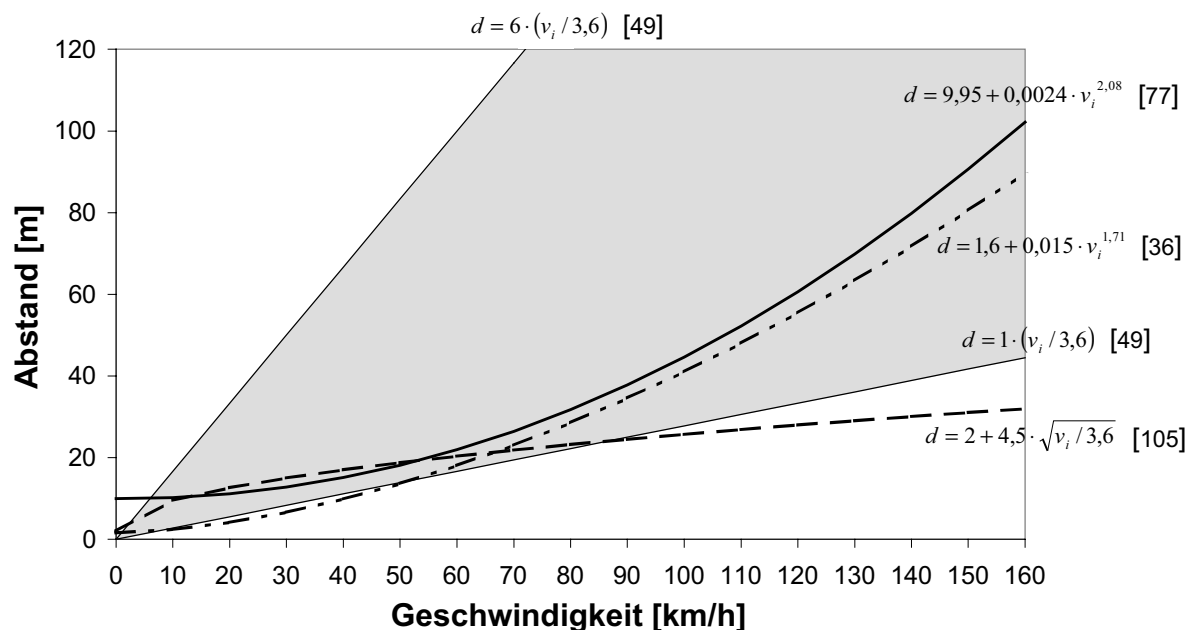
Eine Untersuchung von Folgefahrten mit Führungsfahrzeug auf deutschen Autobahnen in [36] ergaben die Beziehung

$$d = 1,6 + 0,015 \cdot v_i^{1,71} \quad (4)$$

In [77] wird der Abstand anhand von Fahrversuchen im Fahrsimulator in der Form

$$d = 9,95 + 0,0024 \cdot v_i^{2,08} \quad (5)$$

angegeben. Die Testpersonen gehörten der besonders häufig in Unfälle verwickelten Personengruppe im Alter von 19-28 Jahren an, wobei starke Streuungen zwischen den einzelnen Fahrern auftraten. **Bild 2.3** stellt die verschiedenen Ansätze zur geschwindigkeitsabhängigen Beschreibung des Folgeabstandes einander grafisch gegenüber.



**Bild 2.3:** Gegenüberstellung verschiedener Ansätze mit geschwindigkeitsabhängigem Folgeabstand nach [36,49,77,105]

[49] erwähnt bereits den Einfluss der individuellen Eigenschaften der Fahrer. Er nennt dazu das Wahrnehmungs- und Reaktionsvermögen, die vergleichende Beurteilung der Eigenschaften des eigenen Fahrzeugs zum vorausfahrenden Fahrzeug, die Beurteilung der Verkehrssituation hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit für ein Verzögern des vorausfahrenden Fahrzeugs

(Antizipation, s. auch [12]) und die persönliche Risikobereitschaft. Hierzu weist [105] auf einen Zielkonflikt zwischen Eile und Sicherheitsbedürfnis hin, der die Abstandswahl bestimmt.

In [52] findet man als ergänzende Einflussfaktoren den Belastungszustand bzw. die Ablenkung des Fahrers, seinen Ermüdungszustand sowie seinen Fahrstil. Danach stellen Fahrer, die laut Befragung vergleichsweise höhere Geschwindigkeiten bevorzugen, im Mittel um 0,5 Sekunden kleinere Zeitlücken ein. Eine ähnliche Betrachtungsweise verfolgt [97], der das Abstandsverhalten auf eine Überlagerung von Wunschabstand und Differenz zwischen tatsächlicher Geschwindigkeit und bevorzugter Wunschgeschwindigkeit zurückführt. Eine ausführliche Analyse der Abstände in Abhängigkeit von verschiedenen Fahrertypen auf der Basis von (fahr-)demographischen Daten, Persönlichkeits- und Leistungsmerkmalen sowie Fahrstilen führt [1] durch. Danach halten ältere Fahrer größere Abstände ein.

Eine wesentliche Rolle bei der Abstandswahl spielt der subjektive Eindruck von der Verkehrsdichte [47]. Aus Daten auf Basis der automatischen Verkehrszählung lässt sich ableiten, dass Abstände in hohem Maße von der Verkehrsstärke bestimmt werden [78]. Die Anzahl einsicherender Fahrzeuge nimmt mit der Zeitlücke zu [96]. Bei der Anpassung ihrer Folgeabstände an den Technologiefortschritt und das zunehmende Verkehrsaufkommen unterschreiten die Fahrer auch gesetzliche Vorgaben [73].

Einflüsse wie Fahrdauer und Tageslicht sind von untergeordneter Bedeutung [69]. [63] kommt hinsichtlich Dunkelheit und Wochentag zu dem gleichen Schluss. Darüber hinaus führt er auf, dass die Abstände bei Regen zunehmen, wobei nasse Fahrbahnzustände ohne Niederschlag lediglich einen geringen Einfluss aufweisen. Auch [77] ermittelt bei Nebel und vereister Straße vergrößerte Abstände. Die Notwendigkeit, warum bei nasser Fahrbahn größere Abstände zur Vermeidung von Unfällen eingehalten werden müssen, leitet [22] her.

Trotz seiner unzureichenden Fähigkeit, Entfernungen und Geschwindigkeiten zu schätzen, ist der Mensch im dynamischen Fall der Annäherung an ein Hindernis in der Lage, sein Verhalten richtig zu steuern [41]. Dazu bestimmt er die Zeit bis zur Kollision, die sich aus der Änderung des visuellen Bildes ergibt. Optische Signale wie Bremsleuchten und Blinker stellen in diesem Zusammenhang lediglich einen Indikator dar. Der Beginn eines Bremsmanövers wird vielmehr dadurch ausgelöst, dass die Zeit bis zur Kollision einen bestimmten Grenzwert unterschreitet.

Diese Zeit hängt in erster Linie vom Abstand und von der Relativgeschwindigkeit ab. [53] untersuchte diesbezüglich Annäherungen und fand folgende Bedingung für den Verzögerungsbeginn:

$$25 \cdot \sqrt{-\frac{\Delta v(t)}{3,6}} < d(t) < 50 \cdot \sqrt{-\frac{\Delta v(t)}{3,6}} \quad (6)$$

Darüber hinaus haben das Sicherheitsbedürfnis und das Schätzvermögen des Fahrers einen maßgeblichen Einfluss auf den Reaktionszeitpunkt [105]. Eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wurde dagegen von beiden Seiten verneint.

Der Annäherungsvorgang kann als beendet angesehen werden, wenn die Relativgeschwindigkeit unter den fahrertypischen Schwellwert fällt [105]. Die Geschwindigkeit kann nach dem Abbremsen auch kleiner als die des Vorausfahrenden sein [12]. Dies stützt die Beobachtung, dass im Anschluss an den Annäherungsvorgang häufig zunächst kleinere Abstände erreicht wurden als bei Folgefahrt [53].

### 2.2.2 Vorschriften zur Abstandshaltung

Zur Abstandshaltung von Pkw auf deutschen Straßen findet man in der Straßenverkehrsordnung § 4 Abs. 1 [80]:

„Der Abstand von einem vorausfahrenden Fahrzeug muss in der Regel so groß sein, dass auch dann hinter ihm gehalten werden kann, wenn es plötzlich gebremst wird.“

Diese Forderung ist sehr allgemein gehalten und dürfte, auf die Realität angewendet, den Normalfahrer in der Einschätzung der Verhältnisse stark überfordern. Abgesehen davon, was die Regel ist, stellt sich die Frage, woran der korrekte Abstand tatsächlich zu bemessen ist. In der Fahrschule lernt man bereits, dass zwischen der Wahrnehmung eines auslösenden Ereignisses und der Betätigung der Bremse eine Sekunde, die Schrecksekunde, vergeht. Inwieweit werden jedoch die individuellen Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrern und die Komplexität der Verkehrssituation berücksichtigt? [22] merkt beispielsweise an, dass 99 Prozent aller Fahrer eine geringere Reaktionszeit als 0,8 Sekunden aufweisen.

Als Faustregel für den einzuhaltenden minimalen Abstand ist der halbe Tachowert in Metern weit verbreitet, was einer Zeitlücke von 1,8 Sekunden entspricht. Diese Forderung steht im Widerspruch zu den Eigenschaften des Menschen, Entfernungen und Geschwindigkeiten nur schlecht einschätzen zu können [41]. In [50] findet man, dass sich eine solche Faustregel nicht zur Aufnahme in materielle Gesetze eignet.

Der Abstand muss nicht die Möglichkeit miteinbeziehen, der Vorausfahrende könne aufprallen und ohne vollen Bremsweg zum Stehen kommen. Er richtet sich nach Örtlichkeit und Lage sowie der Fahrgeschwindigkeit. Auf Autobahnen bezeichnet die gängige Rechtsprechung die in 1,5 Sekunden durchfahrene Strecke als ausreichenden Abstand bzw. Sicherheitsabstand zu Vorausfahrenden [50]. Dies wird je nach Straßenverhältnissen, Wetter und individueller Bremsverzögerung als Mindestwert angesehen, für den der halbe Tachowert als Anhaltspunkt dienen kann. Eine Unterschreitung des Sicherheitsabstandes wird als Ordnungswidrigkeit gewertet, wenn sie nicht nur „ganz vorübergehend“ geschieht. Dazu setzt die Rechtsprechung eine Mindeststrecke von 250-300 Metern an, wobei ein „zwecks Überholens nach links ausgeschertes“ Fahrzeug nicht als Vorausfahrender zu sehen ist.

Vom Sicherheitsabstand zu unterscheiden ist der gefährdende Abstand, der geringer ist als die in 0,8 Sekunden durchfahrene Strecke. Auch hier gilt die Einschränkung der „nicht ganz vorübergehenden“ Unterschreitung. Als Berechnungsmaßstab für die Regelbuße wird das im Bußgeldkatalog enthaltene Kriterium des halben Tachowertes angesetzt. Danach wird erst dann ein Bußgeld verhängt, wenn der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug 50 Prozent des halben

Tachowertes in Metern unterschreitet [6]. Dies entspräche einer Zeitlücke unterhalb von 0,9 Sekunden. Vielfach wird jedoch eine Neuauflage der Rechtsprechung zur Anpassung an heutige Erkenntnisse zu Bremsreaktionszeiten gefordert [22,41].

Außer dem Abstand zum Vordermann muss der Fahrer nicht auch seinen Abstand nach hinten zum nachfolgenden Fahrzeug beachten. Eine Ausnahme bildet das Einscheren in eine Lücke beim Überholen, das eine Gefährdung des nachfolgenden Verkehrs ausschließen muss [80]. Dabei darf der Abstand nach vorne grundsätzlich erst dann vermindert werden, wenn man ausscheren und zügig vorbeifahren kann [50].

Im internationalen Vergleich wird in England beispielsweise ein Folgeabstand mit einer Zeitlücke von 2 Sekunden empfohlen [73]. Aus den USA ist als California-Code eine Regel bekannt, die einen Abstand von einer Fahrzeuglänge je 10 Meilen pro Stunde Fahrgeschwindigkeit fordert [49].

Eine neue Bedeutung gewinnen die gesetzlichen Regelungen im Zuge der Einführung von Abstandsregelungssystemen. Es ist die Pflicht des Fahrzeugführers, die in den einschlägigen Vorschriften niedergelegten Verkehrspflichten zu beachten, und die im Verkehr erforderliche Sorgfalt gebietet es, gefährliche Situationen zu vermeiden oder zu entschärfen [9]. Funktionstüchtige Abstandsregelungssysteme können dazu beitragen, Verstöße gegen den § 4 zu reduzieren. Nach [9] könnte ein höherer Maßstab an die Sorgfaltspflicht des Fahrzeugführers angelegt werden als bisher. Bei Ausschalten des Systems könnte dann eine vorsätzliche Ordnungswidrigkeit vorliegen. Dies würde sich auf die Höhe des Bußgeldes auswirken, da die Regelsätze von fahrlässiger Begehung und gewöhnlichen Tatumständen ausgehen.

### 2.2.3 Abstandsregelungssysteme

Abstandsregelungssysteme sollen den Fahrer in seiner Tätigkeit zur Längsführung unterstützen und entlasten [109]. Es handelt sich hierbei um eine Weiterentwicklung des konventionellen Tempomaten, der in seiner herkömmlichen Ausführung nur die vom Fahrer gewählte Geschwindigkeit regeln kann. Mit einer erweiterten Funktionalität ist das Abstandsregelungssystem in der Lage, neben der Geschwindigkeit auch den Abstand zu vorausfahrenden und einscherenden Fahrzeugen anzupassen [84]. Damit erweitert sich der Anwendungsbereich zu höheren Verkehrsdichten, die das Einhalten einer konstanten Geschwindigkeit nicht mehr erlauben.

Die wesentlichen Impulse für die Entwicklung von Abstandsregelungssystemen gingen von dem Forschungsprogramm PROMETHEUS (Programm for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) aus, das sich neben Hard- und Software schwerpunktmäßig der Mensch-Maschine-Schnittstelle widmete. Serienreife Systeme sind heute bei BMW, DaimlerChrysler und Jaguar erhältlich. Ein bereits 1995 von Mitsubishi im japanischen Markt eingeführtes System wurde inzwischen wieder eingestellt.

Im Laufe der Entwicklung von Abstandsregelungssystemen sind zahlreiche Bezeichnungen aufgekommen, ohne jedoch Unterschiede im technischen Aufbau oder der Systemkonfiguration zum Ausdruck zu bringen. Als gängigste Abkürzung hat sich heute ACC durchgesetzt, hinter der sich zunächst die Bezeichnung „Autonomous Cruise Control“, später dann „Adaptive Cruise Control“ und heute gelegentlich auch „Active Cruise Control“ verbirgt. Ältere Bezeichnungen wie Autonomous Intelligent Cruise Control (AICC) und Intelligent Cruise Control (ICC) sowie firmen- und produktspezifische Bezeichnungen wie Abstandsregeltempomat (ART), Automatische Distanz Regelung (ADR) und DISTRONIC sind gleichermaßen anzutreffen.

### 2.2.3.1 Technik

Die Bedienung eines ACC erfolgt in herkömmlicher Weise über den Tempomathebel bzw. die Lenkradtasten. Der Fahrer wählt eine Wunschgeschwindigkeit vor, die das ACC analog zu einem Tempomaten einregelt. Ist die freie Geschwindigkeitswahl durch ein vorausfahrendes Fahrzeug eingeschränkt, werden Geschwindigkeit und Abstand selbständig angepasst. Der einzuhaltende Abstand kann vom Fahrer als Zeitlücke im Bereich von 1,0 bis 2,0 Sekunden, je nach Hersteller kontinuierlich oder in Stufen, gewählt werden [24,84]. Eine Anzeige meldet Wunschgeschwindigkeit, Wunschabstand und je nach Ausführung auch Unter- und Überschreitungen des Abstandes dem Fahrer zurück.

Die Verantwortung verbleibt letztlich beim Fahrer. Sobald die Bremse betätigt wird, schaltet sich das System automatisch ab. Darüber hinaus hat der Fahrer die Möglichkeit, die eingestellte Wunschgeschwindigkeit durch Betätigung des Gaspedals zu übersteuern. In diesem Fall bleibt das ACC eingeschaltet und übernimmt erst danach wieder die Regelung.

Die zentralen Komponenten eines Abstandsregelungssystems sind die Sensorik, die Signalverarbeitung und die Stellglieder sowie die Schnittstelle zum Fahrer.

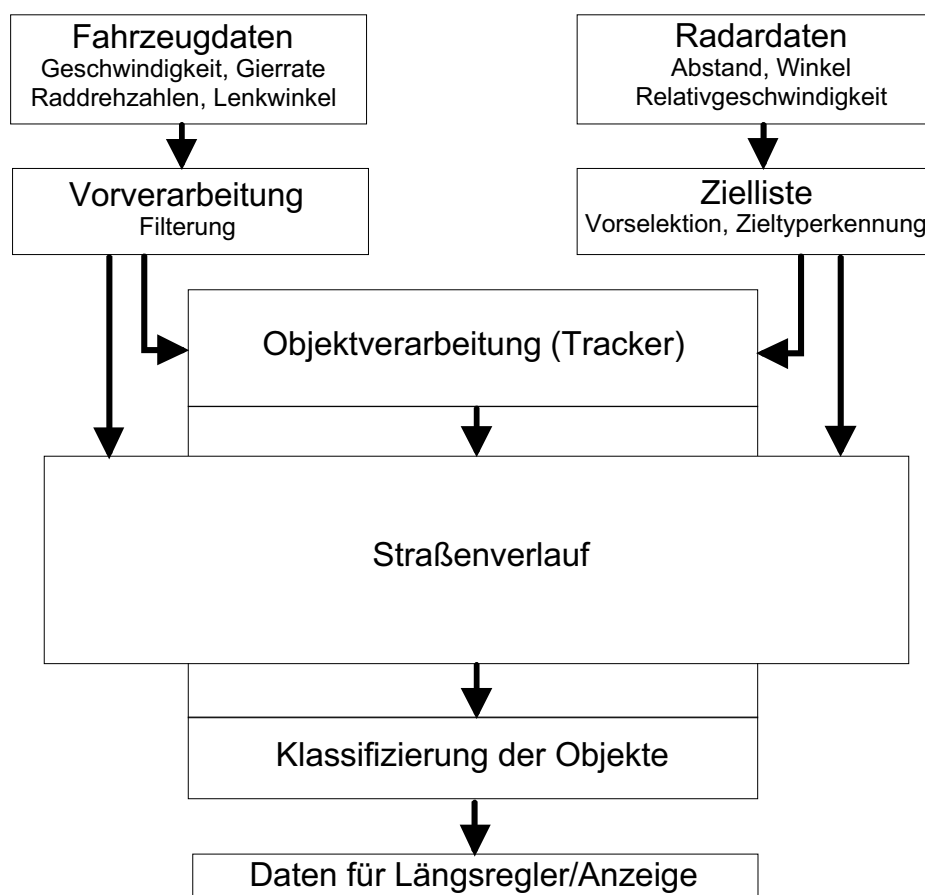
Zur Abstandsmessung kommen grundsätzlich Radar, Laser und Bildverarbeitung in Frage [60,34], deren Erfassungsbereiche mit etwa 150 Metern der Sichtweite des Menschen nahe kommen. Die ersten Systeme waren mit Lidar-Sensoren (Light Detection and Ranging) ausgerüstet, die mit Infrarot-Lasern ( $0,78\mu\text{m}$ - $1\mu\text{m}$ ) arbeiten und den Abstand durch Laufzeitmessung ermitteln. Die Relativgeschwindigkeit muss aus der zeitlichen Änderung des Abstandes berechnet werden. Bedingungen wie Nebel, Regen, Schnee und Gischt schränken die Funktionalität stark ein [61,83]. Nachteilig wirkt sich die starke Empfindlichkeit gegen Verschmutzungen aus, weshalb eine Reinigungsmöglichkeit vorzusehen ist. Ein verdeckter Einbau ist kaum möglich.

Radar liefert dagegen auch bei schlechten Sichtbedingungen gute Ergebnisse, ist jedoch relativ teuer. Inzwischen kommen vermehrt Radarsensoren (Radio Detection and Ranging) zum Einsatz, die entweder nach dem Puls-Doppler-Verfahren oder dem FM-CW-Verfahren (Frequency Modulated Continuous Wave) im gesetzlich vorgeschriebenen Frequenzbereich von 77 GHz arbeiten. Bei beiden Verfahren kann auch die Relativgeschwindigkeit direkt

gemessen werden. Radarwellen sind sowohl gegen Verschmutzungen als auch gegen Nebel und Niederschlag relativ unempfindlich. Die zur Zeit verfügbaren und in der Entwicklung befindlichen Radarsensoren sind mit unterschiedlichen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkeln als Mehrkeulensysteme oder scannende Systeme aufgebaut, um eine laterale Auflösung der Objekte zu ermöglichen.

Derzeit befinden sich auch bildverarbeitende Systeme mit CCD-Kameras in der Entwicklung [100]. Ihre Nachteile sind hoher Rechenaufwand und Preis der aufwendigen Bildverarbeitung. Dafür bietet ihre gute Auflösung jedoch auch die Möglichkeit der Fahrspur- und Objekterkennung.

Die am Markt verfügbaren Abstandsregelungssysteme verfügen überwiegend über Radarsensoren. Die fahrzeugbezogene Messung im Verkehr ermöglicht die Erfassung mehrerer Ziele, deren Trennung in einzelne interessierende Fahrzeuge notwendig ist. Zur Verarbeitung der Signale (**Bild 2.4**) werden die Daten des Radarsensors in einer Zielliste zusammengeführt, aus der die räumliche Lage der relevanten Objekte hervorgeht.



**Bild 2.4:** Ablaufdiagramm der ACC-Funktion [34]

Da Radarsysteme jedoch nicht den vorausliegenden Fahrkurs erfassen können, muss dieser aus weiteren Sensorsignalen wie Eigengeschwindigkeit, Gierrate, Lenkwinkel und Raddrehzahlen bestimmt werden [101]. Anhand des prognostizierten Fahrkurses lassen sich die erfassten

Objekte entsprechend ihrer Fahrspur klassifizieren. Das nächste auf der eigenen Fahrspur befindliche Objekt liefert die Eingangsgrößen für den Geschwindigkeitsregler, die optische Anzeige und die akustische Ausgabe für den Fahrer. Der Signalverarbeitung kommt eine große Bedeutung zu. Hier muss viel Aufwand getrieben werden, um eine sichere Bewertung und eindeutige Zuordnung der erfassten Objekte auch bei Kurvenfahrt möglichst in Echtzeit durchführen zu können.

Mit den Ausgangsgrößen des Geschwindigkeitsreglers werden die Stellglieder angesteuert. Simulationen erleichtern dabei die Anpassung an verschiedene Fahrzeugtypen [46,57]. In einer teilautomatisierten Variante wird das Gaspedal mit einer Kraft beaufschlagt, die dem Fahrer einen Druckpunkt vorgibt [86]. Die empfohlene Gaspedalstellung lässt den Fahrer die Sollgeschwindigkeit einregeln. Als automatisiertes System [34,84], in dem der Fahrer die Längsführung in gewissen Grenzen delegiert, wird die Drosselklappe über die Motorsteuerung angesprochen. Leichte Verzögerungen lassen sich auf diesem Wege über das Schleppmoment verwirklichen. Stärkere Verzögerungen können nur durch Betätigung der Bremsen erzielt werden. Das Bremspedal wird dazu mitgeführt, so dass beim Eingriff des Fahrers das Bremspedalgefühl erhalten bleibt, d.h. die Fahrzeugverzögerung noch der gewohnten Pedalstellung und Pedalkraft entspricht [11]. In Zukunft eröffnen sich mit elektrisch betätigten Bremsen neue Möglichkeiten für einen komfortablen Fremdeingriff [95].

Eingriffe des Fahrers sind bis zu einem gewissen Grad geradezu erwünscht. Die Auslegung der aktiven Bremse realisiert maximale Verzögerungen von ca.  $2 \text{ m/s}^2$ . Auf diese Weise kann das ACC nur Komfortbremsungen ausführen. In den anderen Fällen muss der Fahrer selbst bremsen, wobei er je nach Ausführungsart akustisch gewarnt wird. Weitere Einschränkungen betreffen stehende Hindernisse, die herausgefiltert werden, da die eingeschränkte Objekterkennung Fehlbremungen zur Folge haben könnte. ACC funktioniert nur oberhalb einer Mindestgeschwindigkeit von etwa 30-40 km/h, so dass Bremsungen bis zum Stillstand ausgeschlossen sind. ACC-Systeme der ersten Generation zielen daher auf den Einsatz auf Autobahnen und Schnellstraßen ab. Der mögliche Einsatzbereich endet je nach Hersteller bei 160-180 km/h.

Hintergrund der funktionalen Einschränkungen ist zum einen die Zuverlässigkeit, die trotz technischer Grenzen gewährleisten sein muss. Zum anderen soll dem Fahrer nicht suggeriert werden, er könne sich auf das System verlassen. Es soll ihm bewusst bleiben, dass er die Kontrolle behalten muss. ACC stellt in der derzeitigen Form ein Komfortsystem und kein Sicherheitssystem dar. Weitere Ausbaustufen mit Funktionen wie „stop-and-go“ [75,102,110] und „collision-avoidance“ [109] befinden sich in der Entwicklung. Eine Kopplung von ACC und Navigationssystem stellt [94] vor.

### **2.2.3.2 Untersuchungen**

Die Funktionsstruktur von ACC lässt leicht errahnen, wie stark sich die Einbindung eines solchen Systems auf die Fahrtätigkeit auswirkt. Auf der einen Seite stehen Potentiale zur Verbesserung von Komfort, Sicherheit, Ökonomie und Ökologie im Vordergrund [35], die die



Entwicklung überhaupt ausgelöst haben und vorantreiben. So soll durch eine zeitliche Vorverlegung der Fahrerreaktion eine Vielzahl von Unfällen vermeidbar sein [35,82]. Einer Akzeptanzstudie zufolge reduziere ACC die Ermüdung und den Stress insbesondere bei hoher Verkehrsdichte [5].

Andererseits dürfen auch negative Auswirkungen nicht unbeachtet bleiben, die es zu ergründen und auszuschließen gilt. Hierzu merkt [33] an: „Antizipatorische Wahrnehmungsleistungen und erlernte Reiz-Reaktions-Automatismen sind die herausragenden sensumotorischen Fertigkeiten des Menschen bei der aktiven Teilnahme am Straßenverkehr. Wo das Prinzip Vorhersehbarkeit verletzt wird, entsteht Konfusion beim Fahrer und damit ein Gefährdungspotential für die Sicherheit des dynamischen Prozesses Fahrzeugführung.“

Neben der Sicherheit kommen auch Komfort und Akzeptanz eine hohe Bedeutung zu, ohne die sich keine technische Entwicklung vermarkten lässt. So wurde bereits 1995 ein ACC auf der Basis von Lidar produziert. Schwächen in Positions- und Fahrspurerkennung, Reflexionsstärke, Kurvensicht und Schlechtwetterbetrieb verhinderten jedoch eine Verbreitung, so dass der Vertrieb inzwischen wieder eingestellt wurde [83]. Daher ist nur allzu verständlich, dass zu Beginn im Rahmen von PROMETHEUS neben den technischen Aspekten auch die Wirkungen auf das Fahrerverhalten und die Beurteilung von Komfort und Akzeptanz eine wichtige Rolle gespielt haben. Das Systemverhalten sollte dem Fahrerverhalten eines durchschnittlichen Autofahrers entsprechen und in seinen Reaktionen vorhersagbar und transparent sein [71]. Der Schwerpunkt lag auf der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Die Systemfunktionalität von ACC wurde in zahlreichen Untersuchungen als vielversprechend bezeichnet [103], obwohl die verwendeten Prototypen noch Schwächen aufwiesen. Die Aussagen beruhten dabei überwiegend auf subjektiven Einschätzungen der Versuchsfahrer. In diesem Kontext kommt [1] zu dem Ergebnis, dass zwischen den ACC-Beurteilungen befragter Fahrer und ihrem herkömmlichen Fahrstil bzw. den Eingriffs- und Übersteuerungshäufigkeiten beim Einsatz von ACC kaum ein Zusammenhang besteht.

Im Rahmen des amerikanischen ITS-Programms (Intelligent Transportation Systems) wurde in einem großen Feldtest die freie Nutzung von ACC im täglichen Gebrauch untersucht [u.a. 39,51,81,92]. Das eingesetzte System basierte auf einem Lidar-Abstandssensor und konnte durch Getriebeeingriff mit maximal  $0,7 \text{ m/s}^2$  verzögern. Darauf wird zurückgeführt, dass die Systeme im dichteren Verkehr abgeschaltet wurden. Daher sind die Ergebnisse nicht auf ACC mit Bremsengriff übertragbar [40] und für die heute erhältlichen Systeme nicht repräsentativ. Deutliche Gewinne an Komfort und Sicherheit seien nur bei installiertem Bremsengriff zu verzeichnen [35].

Die größten Beschränkungen der Funktionen von ACC ergeben sich aus dem begrenzten Sichtbereich und der limitierten Situationsinterpretation [84]. Innerhalb seiner Betriebsgrenzen muss einerseits die volle Funktionalität sichergestellt sein, um die Fahrsicherheit zu gewährleisten [71]. Andererseits stehen die funktionalen Einschränkungen nicht nur der Akzeptanz entgegen, sondern verhindern auch einen gezielten Einsatz als Sicherheitssystem.

ACC ist daher allenfalls als Meilenstein zur absoluten Kollisionsvermeidung zu verstehen [104].

Obwohl heute am Markt befindliche ACC-Systeme eine komfortorientierte Unterstützung des Fahrers darstellen, kann das kinästhetische Feedback eines fremdinitiierten Bremsmanövers die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Verkehrssituation lenken und damit die Sicherheit erhöhen [73]. Praktische Erfahrungen haben dies bestätigt [84]. In Simulationen und Fahrversuchen hat sich mit ACC eine Reduzierung der Belastung des Fahrers ergeben [56].

Dennoch können ACC-Systeme dem Fahrerverhalten nicht ausreichend gerecht werden [68]. [1] regt an, das ACC-Verhalten an verschiedene Fahrertypen anzupassen, da die Einstellbarkeit von Wunschabstand und –geschwindigkeit hierzu nicht ausreicht. In Abhängigkeit vom Fahrer und der Situation werden unterschiedliche Reaktionsstärken und –zeitpunkte gefordert. Insbesondere ältere Fahrer fallen in den durchgeführten Untersuchungen signifikant durch kleinere Geschwindigkeiten und größere Abstände auf, die sich bei Vergleichsfahrten mit ACC auch in den gewählten Einstellungen wiederfinden lassen. Darüber hinaus tendieren sie jedoch auch zu niedrigeren Beschleunigungen und höheren Verzögerungen gegenüber jüngeren Versuchsteilnehmern in vergleichbaren Situationen. Das Fazit lautet, dass ältere Fahrer hinsichtlich ihrer Leistungsminderungen durch den Einsatz von ACC sinnvoll zu unterstützen seien.

In [68] wurde zur Fahreradaptation ein Fuzzy-Controller entwickelt, der in einer Trainingsphase von ca. 15 Minuten Dauer trainiert wird. Auch [5] erachtet eine Anpassung mit Fuzzy als wünschenswert. Fuzzy-Modelle und neuronale Netze gehen dabei häufig einen Schritt weiter und verfolgen die Zielsetzung automatisierten Verkehrs [74,105]. Fuzzy-Regler zeigen sich unempfindlich gegenüber Störungen und zeitlich veränderlichen Regelstrecken, weisen jedoch bei einer aufwendigen Feinabstimmung keine einfachen Stabilitätskriterien zur Regleranalyse auf [103]. Neuronale Netze weisen nichtlineare Abbildungseigenschaften auf und können während des Betriebes lernen. Damit würden sie jedoch auch unerwünschte Eigenschaften des Fahrers abbilden.

In [72] wurde das Folgeverhalten der Fahrer mit neuronalen Netzwerken analysiert. Damit sollte zeitsparend mit einem einzigen Modell das Verhalten für Annäherung, Folgefahrt und Zurückfallen modelliert werden. Zur Übertragbarkeit des anhand spezieller Bedingungen erstellten Modells auf allgemein vorzufindende Bedingungen wurde jedoch auf noch anstehende Untersuchungen verwiesen.

Neben den die Fahrer-Fahrzeug-Einheit betreffenden Aspekten sind auch die Rückwirkungen auf den Verkehr von Bedeutung. So wurden bei freier Geschwindigkeitswahl mit ACC niedrigere Geschwindigkeiten ermittelt, wobei sich auch die beobachteten Geschwindigkeitsübertretungen zu niedrigeren Werten hin verschoben [1]. Abgesehen von diesen Untersuchungen beruhen die bekannten Betrachtungen zu den Folgen von ACC für den Verkehrsablauf bislang auf Simulationen.

Hinsichtlich der Stabilität von Fahrzeugkolonnen muss eine entsprechende Abstimmung der Regler gewährleistet sein, was sich gleichzeitig auf den Kraftstoffverbrauch niederschlägt. Auswirkungen unterschiedlicher Konfigurationen lassen sich mit einem Simulationsprogramm wie PELOPS untersuchen [71], das die Einbettung von mikroskopischen Fahrermodellen erlaubt.

In [89] werden Simulationen für Abstandswarnsysteme beschrieben. Anhand durchgeführter Messungen wurde das wahrnehmungsbasierte Modell von [105] neu kalibriert, um Leistungsfähigkeit, Sicherheit und Komfort in Abhängigkeit von verschiedenen Ausrüstungsgraden zu untersuchen. Da zum damaligen Zeitpunkt der Einsatz von Abstandswarnsystemen noch ausstand, ihre endgültige Funktion nicht feststand und auch zum Zusammenspiel mit dem Fahrer noch keine Aussagen getroffen werden konnten, erfolgten lediglich generelle Betrachtungen. [37] gibt für Abstandswarnsysteme eine Abschätzung an, dass Unfälle vermieden bzw. ihre Folgen gemindert werden können.

Abstandsregelungssysteme reduzieren den Anteil kleiner Zeitlücken [8], wobei das Nutzungsverhalten nicht weiter berücksichtigt wurde. [103] gibt einen Überblick über Simulationsuntersuchungen, die der Verkehrsstärke einheitlich eine starke Abhängigkeit von der Zeitlücke bestätigen. Danach verursacht ACC eine Beruhigung des Verkehrsablaufes und führt zu einer geringen Steigerung der Leistungsfähigkeit des Verkehrs, wobei die Verbesserung des Verkehrsflusses stark vom Verbreitungsgrad von ACC abhängt [75]. Dagegen sieht [8] kaum einen Einfluss auf die Auslastbarkeit. Insbesondere Spitzenzeiten der Verkehrsbelastung erscheinen für den Einsatz von ACC weniger geeignet, da bei gängigen Zeitlücken Kolonnenbildung und häufige Spurwechsel den Verkehrsfluss stören würden [73]. Anhand der durchgeführten Simulationen erscheint es unwahrscheinlich, dass die Systeme die Kapazität der Verkehrsstraßen in der nahen Zukunft signifikant erhöhen könnten. Gleichzeitig wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass weiterentwickelte Modelle des Fahrerverhaltens notwendig sind, um die Auswirkungen von ACC realistischer simulieren zu können.

#### **2.2.4 Methoden zur Erforschung der Aktiven Sicherheit**

Es ist dringend erforderlich, sich über die Risiken und Chancen neuer Technologien im Klaren zu sein und den richtigen Umgang mit Assistenzsystemen zu gewährleisten [31]. Die Aktive Sicherheit ist ein maßgeblicher Aspekt, der über die Verbreitung und den Nutzen von Assistenzsystemen entscheidet. Begrenzt wird der Nutzen solcher Systeme durch die öffentliche Einstellung zu grundsätzlich akzeptierten Risiken [106].

Maßnahmen zur Verbesserung der Aktiven Sicherheit betreffen die Bereiche Wahrnehmungssicherheit, Bedienungssicherheit, Konditionssicherheit und Fahrsicherheit [15]. Die Durchführung der Maßnahmen durchläuft die vier Phasen Problemanalyse, Maßnahmenplanung, Implementation und Wirksamkeitskontrolle [3]. Die alle Phasen begleitende Evaluationsforschung umfasst neben der Identifikation der Wirkungen die

Erklärung des Zusammenhangs zwischen Maßnahme (Ursache) und Wirkung. Hierbei wird zwischen formativer und summativer Evaluation unterschieden.

Die formative Evaluation beinhaltet die Sammlung und Bewertung von Informationen vor und während der Entwicklung von Maßnahmen. Unter summativer Evaluation versteht man die Beurteilung der angestrebten Wirkungen und der unbeabsichtigten Nebenwirkungen.

Letzteres kann als Produktevaluation durchgeführt werden, wobei ausschließlich das Unfallgeschehen als Produkt der Maßnahme betrachtet wird. Dagegen befasst sich die Prozessevaluation mit der Beurteilung des Prozesses und seiner Bedingungen, die zum Zustandekommen der Unfälle führen. Voraussetzungen für die Sicherheitsanalyse im Rahmen einer Wirksamkeitskontrolle sind die hypothetische Beschreibung der direkten Wirkungen in der Verkehrssituation, ihre Messung und statistische Überprüfung mittels geeigneter Kenngrößen und die Kontrolle des unterstellten Ursache-Wirkungs-Modells.

Der Straßenverkehr stellt ein Gesamtsystem dar, das aus den Teilsystemen Verkehrsteilnehmer, Verkehrsmittel, Verkehrsfläche und Verkehrsregelung besteht [62]. Systeme lassen sich auf unterschiedlichen Ebenen formulieren. In diesem Sinne kann auch das System Fahrer-Fahrzeug-Umwelt als offenes System im Rahmen des übergeordneten Gesamtsystems bezeichnet werden. Das Systemziel ist der Transport von Gütern und Menschen. Die Sicherheit beschreibt neben Wirtschaftlichkeit, Komfort und Ökologie ein wichtiges Nebenziel.

Für die positive Beeinflussung der Aktiven Sicherheit erscheint nur eine Systembetrachtung sinnvoll. Eine Wirksamkeitskontrolle einzelner Maßnahmen kann nur aufgrund einer Analyse des ganzen (in diesem Fall zu betrachtenden) Systems erfolgen [62], da bei gezielten Beeinflussungen des Gesamtsystems durch Änderungen an einem Systemelement mit Auswirkungen auf alle Systemelemente gerechnet werden muss. Dazu sind die Systemzustände zu betrachten, die sich aus den Eigenschaften der Systemelemente und ihren Wechselwirkungen untereinander ergeben. Dies führt zu der Forderung nach differenzierten Versuchsplänen. Unter dem Aspekt, dass dem Straßenverkehr ein komplexes Ursachen-Wirkungsgefüge zugrunde liegt, sind zur Beschreibung des Systemverhaltens eine Klassifizierung der Systemzustände und geeignete Beobachtungsmethoden erforderlich. Diese müssen eine mehrdimensionale Analyse ermöglichen, da die Ursachen erfasster Merkmale selten eindeutig sind.

Die Sicherheit stellt zur Beurteilung der Leistung des Straßenverkehrs ein wichtiges Kriterium dar. Sie entzieht sich jedoch einer einfachen Betrachtung, da Sicherheit nicht direkt beobachtbar oder messbar ist. Somit stellt Sicherheit ein theoretisches Konstrukt dar, das durch geeignete Indikatoren operationalisiert werden muss [55].

Sicherheit wird allgemein als Zustand der Gefahrlosigkeit verstanden. Gefahr wird dabei synonym mit dem Risiko, einen Schaden zu erleiden, verwendet. Sicherheit ist somit die konträre Größe zum Risiko, für das verschiedene Definitionen existieren [54]. Der Begriff Risiko bezieht sich zum einen auf die Wahrscheinlichkeit von unerwünschten Konsequenzen,

zum anderen steht er für das Ausmaß der negativen Konsequenzen selbst. Auf dem Gebiet der Verkehrssicherheit erweist es sich als zweckmäßig, für die Beurteilung von Sicherheit sowohl die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von schädigenden Ereignissen als auch die Höhe des dabei entstehenden Schadens zu berücksichtigen.

Die Wahrscheinlichkeit beinhaltet zwei Komponenten. Die erste betrifft die Häufigkeit von sicherheitsrelevanten Ereignissen. Diese absolute Größe allein ist jedoch nicht aussagefähig, solange sie nicht auf ein quantitatives Maß bezogen wird, das eine zugrunde liegende Gesamtmenge als Vergleichsbasis beschreibt. Hierzu eignen sich Expositionsmaße, die sich in bestandsspezifischer und verkehrsspezifischer Form angeben lassen [54]. Letztere berücksichtigen die aktive Teilnahme am Verkehr beispielsweise in Form von Dauer oder zurückgelegter Wegstrecke.

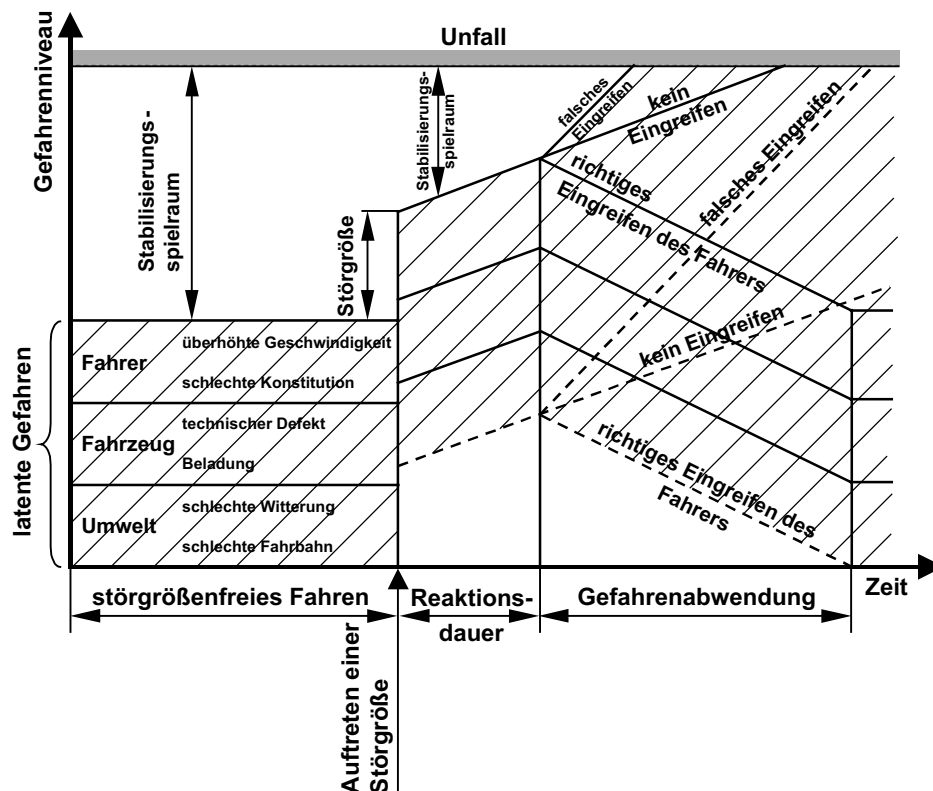
Die Analyse von Verkehrssicherheit kann nur auf der Basis der genannten Informationen erfolgen. In komplexen Systemen wie dem Straßenverkehr stellt sich das Problem, diese Informationen geeignet und ausreichend zu erfassen. Der weitläufig gebräuchlichste Indikator für die Erforschung der Verkehrssicherheit sind daher bislang Unfälle mit Personen- und Sachschaden. Die Beurteilung erfolgt in der Regel auf der Basis einer statistischen Analyse von Unfallzahlen als absolute oder auf Mengen- oder Expositionsdaten bezogene Größen. Bereits die Erhebung der Daten weist neben der einheitlichen Erfassung eine gewisse Problematik auf.

So bezeichnet [62] Unfälle als statistisch seltene Ereignisse, deren tatsächliche Häufigkeit im Verhältnis zur Anzahl möglicher Unfälle außerordentlich klein ist. Die situationsspezifischen Zufallsbedingungen können nicht systematisch erfasst und ausreichend scharf gegen zufallsunabhängige Verhaltensbedingungen abgegrenzt werden. Die Datenerhebung kann ohnehin nur retrospektiv erfolgen. Daher sind Unfalldaten für Neuentwicklungen nicht vor Markteinführung verfügbar. Außerdem enthalten sie zwangsläufig überwiegend situationsbezogene Merkmale, die eher Ursachen von Unfallfolgen als die Unfallursachen selbst liefern. Aber gerade die dem Unfall zeitlich vorausgegangenen Verhaltensbedingungen, die [62] mittelbare Unfallursachen nennt, sind für die aktive Sicherheit von eigentlichem Interesse. Sie lassen sich im Rückblick jedoch nur bedingt ermitteln, so dass die Zuverlässigkeit der Unfallrekonstruktion äußerst fraglich bleibt.

Auch wenn situative Aspekte des Unfallherganges häufig noch sehr differenziert erfasst werden, führt die notwendige Klassifizierung und Zusammenfassung der Daten im Zuge der Datenaufbereitung unweigerlich zu Informationsverlusten. Aus der komplexen Struktur der Einflussgrößen ergibt sich eine zeitaufwendige Verarbeitung. Daher fordert nicht nur [42] schnellere, direktere und effizientere Wege der Sicherheitsmessung, die eine breitere Datenbasis zur Verfügung stellen. Trotzdem sollten sich theoretische Überlegungen und Aussagen aus der Unfallanalyse und aus der Sicherheitsforschung ergänzen.

Nach [62] ist Unfallfreiheit nicht gleichbedeutend mit Verkehrssicherheit. Dagegen schließt aber verkehrssicheres Verhalten den Unfall aus, wenn er nicht ausschließlich zufallsabhängig ist. Diesem Ansatz liegt zugrunde, dass sich der zeitliche Verlauf eines Unfalls in Pre-Crash-,

Crash- und Post-Crash-Phase aufteilt. Die Vorunfallphase lässt sich nun weiter in eine Ereignissequenz unterteilen, in der das Gefährdungspotential zeitlich zunimmt [3]. Die Ereignisse stellen Störungen im System dar, die den Übergang zu Zuständen auf niedrigerem Sicherheitsniveau bewirken [43]. Am Ende dieser Zustandskette wird das System instabil, es kommt zum Unfall (**Bild 2.5**).

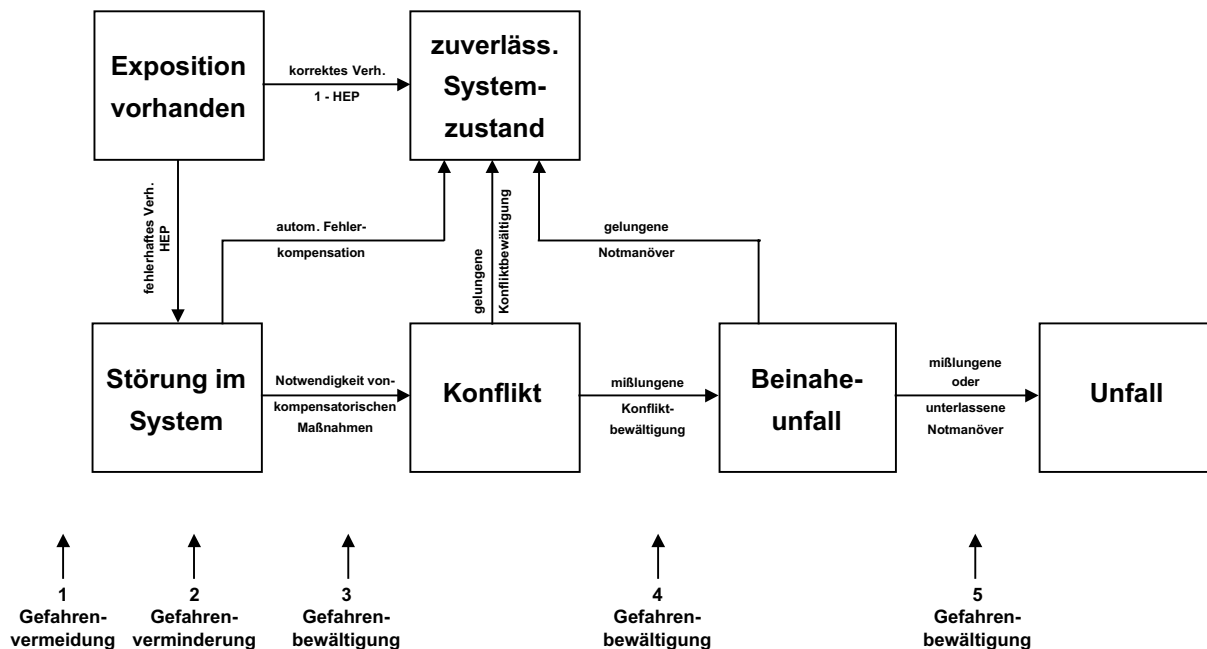


**Bild 2.5:** Handlungsablauf für ein kritisches Fahrmanöver [19]

Der Unfall ist nicht zwangsläufig die Folge eines zu Beginn auftretenden Fehlers. Zum Teil ist das Straßenverkehrssystem selbst in der Lage, Fehler unbemerkt vom Fahrer zu kompensieren. Ansonsten müssen Reaktionen des Fahrers das System wieder in den stabilen Zustand überführen. Nur falsche oder ausbleibende Reaktionen führen in diesem Fall zu einem höheren Gefahrenniveau.

Entsprechend nimmt mit dem Sicherheitsniveau auch die Häufigkeit dieser Zustände ab. Zwischen den einzelnen Zuständen gibt es Übergangswahrscheinlichkeiten, die von der Kompensationsfähigkeit des Systems bzw. der Qualität der Gegenmaßnahmen abhängen. Trotzdem erlauben die verschiedenen Sicherheitszustände unabhängig von den tatsächlichen Folgen eine Vorhersage des Systemversagens. Voraussetzung ist die einwandfreie Erhebung dieser Zustände und die Kenntnis der Übergangswahrscheinlichkeiten. Somit bietet sich der Vorteil einer häufigeren Beobachtungsmöglichkeit verbunden mit einer geringeren Zufallsabhängigkeit.

Es ist zweckmäßig, die Sicherheitszustände nicht kontinuierlich zu skalieren, sondern anhand kennzeichnender Merkmale in Klassen einzuordnen [54]. Die Sicherheitsniveaus einer Klasse sind zwar ähnlich, können jedoch nie vollkommen übereinstimmen. Die Einordnung erfolgt nach Regelzustand, Fehlerzustand, Konfliktzustand, Unfallzustand und Schadenszustand. Das Interaktionsmodell von [43] in **Bild 2.6** sieht eine etwas praktikablere Aufteilung vor.



**Bild 2.6:** Interaktionsmodell für Verkehrsvorgänge [43]

Der Zustand „Exposition vorhanden“ bzw. Regelzustand ist dadurch gekennzeichnet, dass sich das System nach seinen Regeln, d.h. korrekt verhält.

Kennzeichen des Fehlerzustandes ist das Auftreten eines Fehlers bei einer Systemkomponente, so dass sich das System nicht mehr im vorschriftsmäßigen Zustand befindet oder von einem gültigen Standard abweicht. In [87] werden Fehlerkriterien aus normativen Fahrermodellen für akzeptable Verhaltensweisen bei der Fahrspurhaltung und dem Durchqueren von Verkehrsknotenpunkten abgeleitet. [54] merkt an, dass die Definition von Fehlerzuständen ein- und mehrdimensional erfolgen kann. Die mehrdimensionale Betrachtung berücksichtigt Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten. Ein vermeintlicher Fehlerzustand kann so in Verbindung mit dem Merkmal einer anderen Systemkomponente wieder vorschriftsmäßig erscheinen. Dies stellt keinen Widerspruch dar, sondern betont, dass die Systemkomponente das Kriterium liefert, aber die Sicherheitsrelevanz am System beurteilt werden muss.

Der Konfliktzustand setzt das Auftreten eines Fehlers voraus. Es liegt eine Störung im System vor, die nur durch eine kompensatorische Handlung ausgeglichen werden kann. Die Bewältigung dieses Zustandes läuft kontrolliert ab, d.h. es steht genug Zeit zur Verfügung, um Maßnahmen anzuzeigen und andere Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen.

Der Beinahe-Unfall entsteht, wenn die Konfliktbewältigung fehlgeschlagen ist. Auf die unerwartete Situation, die meist mit starken Gefühlen verknüpft ist, kann nur noch unkontrolliert reagiert werden. Die Unfallvermeidung steht im Mittelpunkt allen Handelns, ohne andere Umstände zu berücksichtigen.

Typisches Merkmal eines Unfalls ist die Kollision mit Unfall- oder Sachschaden.

Die Beobachtung derartiger Zustände soll der deskriptiven und kausalen Beschreibung von Verkehrssicherheit dienen. Hierzu werden Kriteriumsvariablen und Einflussgrößen benötigt [54]. Die Kriteriumsvariablen charakterisieren das sicherheitsrelevante Verhalten des Systems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt und liefern die Indikatoren als Messgrößen. Damit hängt die Güte der Sicherheitsbeurteilung stark von der Definition der Kriteriumsvariablen ab und erfordert deren sorgfältige Auswahl. Die Einflussgrößen dagegen beschreiben die Randbedingungen. Sie setzen sich aus Faktoren zusammen, die für die Erklärung des Sicherheitszustandes und seiner Änderungen benötigt werden. Dazu gehören sowohl temporär fortdauernde Merkmale wie meteorologische, fahrer- oder fahrzeugbezogene Daten als auch situative Merkmale.

Als Kriteriumsvariablen nennen [3] und auch [42], der genau genommen von Beobachtungsvariablen spricht, Geschwindigkeit, Bewegungslinie, Abstände, Fahrprobleme, Verkehrsregelübertretungen und Verkehrskonflikte. Eine geeignete Beschreibung dieser Variablen und ein Vergleich mit den Soll-Werten bzw. dem Soll-Verhalten liefert die Indikatoren, mit denen sich Verkehrssicherheit beschreiben lässt. Neben den kritischen Ereignissen, die mit den Indikatoren erfasst werden, ist es auch notwendig, die Art und Weise der Problemlösung zu erheben. Dies erlaubt Aussagen zur Kompensationsfähigkeit des Systems und zur Stabilisierbarkeit durch den Fahrer, die letztendlich die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den einzelnen Sicherheitszuständen bestimmen.

Mit den Indikatoren lässt sich die Häufigkeit von sicherheitsrelevanten Ereignissen ermitteln. Die Folgen können ebenfalls erfasst werden, sei es über die Indikatoren eines sich anschließenden Zustandes mit höherem Gefährdungspotential oder die Stabilisierung des Systems im Regelzustand. Für die Erhebung ist ein abgrenzbarer Beobachtungsraum zu bestimmen. Dementsprechend handelt es sich um eine Stichprobe, die auf Expositionsmaße bezogen werden muss, um die Aussagen zur Sicherheit bewerten und vergleichen zu können. Hier reicht die Verwendung von simplen Zeit- oder Streckenmaßen nicht aus, da die große Anzahl von Einflüssen und die Vielfalt ihrer Konstellationen eine differenziertere Betrachtung notwendig machen.

Bei der Betrachtung des Fahrerverhaltens sind die Bedingungen und Beziehungen, unter denen es stattfindet, von unabdingbarem Interesse. Die Komplexität des Straßenverkehrs erfordert hier eine Systematisierung, die abgrenzbare Analyseeinheiten schaffen muss, in denen das Fahrerverhalten die Sicherheit betreffend beurteilt, verglichen und auch quantifiziert werden kann [42]. [54] sieht das Ziel in einer Normierung der Exposition. Die in Raum, Zeit und Verhalten abgrenzbaren Einheiten beschreiben die vernetzte Interaktion der Systemkomponenten und werden von [38] als Verkehrssituation bezeichnet.



[3] führt eine Klassifikation nach verkehrstechnischen Gesichtspunkten durch. Das Verhalten erklärt sich aus den Umwelтанforderungen, d.h. die räumlichen und physikalischen Gegebenheiten definieren die Verkehrssituation und steuern das Verhalten. Die Abgrenzung bezieht sich hier auf die Gestaltungsmerkmale der Verkehrsanlage. Unter dem Aspekt des Gesamtsystemansatzes muss die Betonung jedoch auf der Interaktion zwischen Fahrer-Fahrzeug-System und Umgebung liegen. Andere Verkehrsteilnehmer finden erstmals Berücksichtigung in der unscharfen Einteilung der Zustandsformen des Verkehrs in frei, teilgebunden und gebunden [70]. Die subjektive Bedeutung von Situationsvariablen spielt dabei eine wichtige Rolle. In [42] wird eine Anforderungsanalyse vorgeschlagen, die Aufgabenmerkmale mit Verhaltensweisen verknüpft und das Sollverhalten in der jeweiligen Situation analysiert.

Auch Untersuchungen von [7] ergeben, dass die subjektive Erlebniseinheit von Kraftfahrern festlegt, welche Umgebungsänderungen Beginn bzw. Ende einer Situation bedeuten. Daraus ergibt sich ein Klassifikationssystem für Verkehrssituationen aus Fahrersicht, das [42] modifiziert und vereinfacht. Anhand des Klassifikationssystems werden Situationskataloge zusammengestellt, die für bestimmte Fahrtzwecke die repräsentativen Verkehrssituationen und deren Häufigkeiten angeben. In [44] wird eine Klassifikation ACC-relevanter Situationen auf Autobahnen entwickelt.

Der Verkehrsablauf besteht aus einer Abfolge von Situationen, in denen dem Fahrer auch Handlungsalternativen zur Verfügung stehen, die verschiedene Folgesituationen erzeugen [27]. Der Fahrer ist als Teil der Verkehrssituation zu betrachten, da er sie erzeugt, beeinflusst und beendet [48]. Letztendlich definiert die Handlungsabsicht die Situation [88]. Demnach ist die Entscheidungsfreiheit des Fahrers, die mehr oder weniger immer vorhanden ist, als das wesentlichste Merkmal von Straßenverkehr zu betrachten. Der daraus resultierende Zufallscharakter muss bei der Behandlung von Verkehr immer Berücksichtigung finden.

Für die Beurteilung der Sicherheit anhand von situationsbezogenen Sicherheitskenngrößen ist es wünschenswert, deren Beziehung zum Unfallkriterium zu klären [3]. Der Erfolg der Validierung hängt wesentlich von der Güte der Messungen und Qualität der dabei erhobenen Daten ab. Das betrifft sowohl die gezielte Erhebung der Sicherheitskenngrößen als auch die statistische Aufbereitung der Unfalldaten, da diese bereits erhoben sind. Die Voraussetzungen für eine Validierung lassen sich verbessern, wenn die Kriterien Objektivität, Reliabilität und Repräsentativität beachtet werden.

## 2.3 Fazit

Entwicklungen auf dem Gebiet der Fahrzeugtechnik sind maßgeblich von dem Gedanken geprägt, die Sicherheit im Straßenverkehr zu verbessern. Nach deutlichen Erfolgen bei der Passiven Sicherheit gilt das Augenmerk nun verstärkt der Vermeidung von Unfällen. Fortschritte in der Sensortechnologie und in der Signalverarbeitung liefern heute die Voraussetzungen für Assistenzsysteme, die den Fahrer in der Bewältigung seiner Aufgaben

unterstützen und entlasten sollen. Ein aktuelles Beispiel stellt das Adaptive-Cruise-Control (ACC) dar, das die Geschwindigkeit und den Abstand zu vorausfahrenden und einsicherenden Fahrzeugen regelt.

Bei der Beurteilung von ACC sah man sich lange Zeit mit der Problematik konfrontiert, dass die wenigen verfügbaren Prototypen eine eingeschränkte Funktionalität aufwiesen. Die Verbesserung der Technik hatte Priorität, bevor ihr Einsatz repräsentativ beurteilt werden konnte. Gleichzeitig machte die Technik in diesem frühen Entwicklungsstadium solch rasante Fortschritte, dass angesichts der schnell veralteten Systemstände die Aussagekraft der Ergebnisse bereits mit ihrer Entstehung in Frage gestellt war. Abgesehen davon gibt es zahlreiche Untersuchungen in Form von Befragungen zu Akzeptanz und Nutzen von ACC. Sie basieren jedoch weitgehend auf subjektiven Einschätzungen und Beurteilungen, die sich überwiegend sehr wohlwollend und optimistisch zu den Aussichten von ACC äußern. Das frühe Entwicklungsstadium ließ keine detaillierteren Aussagen zu, um ACC-Systeme objektiv mit dem Verhalten der Fahrer vergleichen zu können. Mit der Markteinführung der ersten Generation von Abstandsregelungssystemen ist nun die Grundlage für solche Untersuchungen geschaffen.

Bei der Abstimmung von ACC steht man vor der Herausforderung, eine allseits anerkannte Zielvorstellung zu verwirklichen. Das Abstandsverhalten ist ein Kompromiss einander widerstrebender Forderungen. Große Abstände senken die Wahrscheinlichkeit für Auffahrunfälle. Eine große Straßenkapazität wird dagegen bis zu einem gewissen Maß mit kleinen Abständen verbunden. Zu kleine ebenso wie zu große Abstände würden vom Fahrer jedoch nicht akzeptiert werden. Solche Störungen fördern das Fremdheitsgefühl, so dass die allgemeine Kritikbereitschaft dem Produkt gegenüber anwächst [98].

Die Optimierung nach den verschiedenen Zielvorstellungen weist eine gewisse Problematik auf, die sich am Beispiel der verkehrsflussabhängigen Geschwindigkeitsbeschränkungen bereits offenbart. Dort gestaltet sich eine Maximierung der Straßenkapazität in der Praxis schwierig, da man die Gesetzmäßigkeit des Abstandsverhaltens nicht ausreichend kennt [22]. Ähnliches betrifft die Computersimulationen, die der Validierung bedürfen, denn Simulieren heißt Nachahmen und nachahmen kann man nur Bekanntes [105].

Die Problematik mag kaum verwundern, da lange Zeit die Möglichkeit gefehlt hat, Abstände komfortabel und rückwirkungsfrei zu messen und bei akzeptablem Aufwand auswerten zu können. Abgesehen davon hängen die eingehaltenen Abstände zwangsläufig von Interaktionen ab, d.h. die Wunschgeschwindigkeit, langsamere Fahrzeuge und die Möglichkeit des Überholens sind konkurrierende Einflussfaktoren. Das Verhalten ist dabei immer die Summe aller Einflussgrößen, die der Fahrer wahrnimmt. Die Wahrnehmung hängt wiederum von individuellen Reizschwellen und der Aufmerksamkeit bzw. Ablenkung ab. All das erschwert, auf die Ursachen zurückzuschließen und das Abstandsverhalten zu modellieren, wie die großen Streuungen existierender Modelle beweisen.

Die Modellierung des Fahrerverhaltens wird in der Literatur ausgiebig behandelt. Ein Großteil widmet sich der Beschleunigung und damit dem Regelverhalten des Fahrers, muss zur Abbildung von Abständen jedoch als ungeeignet bezeichnet werden. Es werden verschiedenste Methoden und Modellarten entwickelt, ohne im Ergebnis den realen Verhältnissen ausreichend gerecht werden zu können. An vielen Stellen wird auf die Notwendigkeit der Adaption an Situation und Fahrer hingewiesen. So wird beispielsweise die Abnahme der Abstände mit der Verkehrsstärke in zahlreichen Literaturstellen angesprochen, ohne jedoch näher quantifiziert zu werden. Die Modelle repräsentieren die Realität allenfalls unter starken Einschränkungen, was ihre Verwendung im vorliegenden Fall weitestgehend ausschließt.

Darüber hinaus beziehen sich die meisten existierenden Modelle auf die Folgefahrt, die im Normalfall ohne große Eingriffe abläuft. Aber gerade dynamische Situationen stellen hohe Anforderungen an ein ACC, so dass eine Ausweitung der Modelle auf Annäherung an und Einscheren von anderen Fahrzeugen unumgänglich ist. In diesem Zusammenhang erscheint es hilfreich, dass die Notwendigkeit zum Handeln den Spielraum des Fahrers limitiert. Andere Verkehrsteilnehmer schränken in Verbindung mit der Straßenführung die Bewegungsfreiheit ein, so dass angesichts der Kollisionsvermeidung situationsabhängig nur begrenzter Raum zur Reaktion verbleibt. Inter- und intraindividuelle Streuungen im Verhalten sind nicht so stark ausgeprägt. Daher sind beispielsweise Folgefahrten bei Verzögerung eindeutiger zu modellieren, als dies bei Beschleunigung der Fall ist [25]. Die Ursache ist in den unterschiedlichen Auswirkungen auf das Sicherheitsempfinden des Fahrers zu finden.

## 2.4 Zielsetzung

Die Notwendigkeit, das Verhalten eines ACC anwendungsgerecht abzustimmen und auch im Vergleich zur herkömmlichen Fahrtätigkeit überhaupt beurteilen zu können, offenbart den dringenden Bedarf an Fahrermodellen. Trotz der rasanten Fortschritte im Bereich der Computertechnik fehlt jedoch nach wie vor eine ausreichend genaue Beschreibung des Fahrerverhaltens [108]. Die aus der Literatur bekannten Erkenntnisse zur Abstandshaltung können den gestiegenen Anforderungen nicht genügen. Angesichts der heutigen Verkehrsbelastungen und der vielfältigen Interaktionsmöglichkeiten der Verkehrsteilnehmer gestalten sich die Verhältnisse zudem derart komplex, dass auch die Modellierung des Fahrerverhaltens detaillierter weiterentwickelt werden muss.

Gerade die Anforderungen und Eigenschaften des Fahrers sind es, die in der Zukunft den technischen Fortschritt bestimmen. Der Sinn technischer Entwicklungen muss bereits im Entwicklungsprozess geklärt werden, wozu Fahrermodelle gebraucht werden. Mit ihrer Hilfe ist man in der Lage, subjektive Bewertungen potentieller Käufer bereits im Vorfeld abschätzen zu können. Mit der Verfügbarkeit von ACC ist die Voraussetzung geschaffen, die Abstände zu den relevanten Fahrzeugen erfassen zu können, die die Verhaltensweisen des Fahrers mitbegründen.

Vor diesem Hintergrund soll das Abstandsverhalten auf Autobahnen mit und ohne Einsatz eines ACC untersucht werden. Versuchsfahrten im öffentlichen Straßenverkehr mit einem repräsentativen Kollektiv an Probanden sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit situative und menschliche Faktoren das Abstandsverhalten beeinflussen, und wie sich Abhängigkeiten in geeigneter Weise formulieren lassen. Da Fahrerverhalten durch mannigfaltige Einflüsse bedingt ist, liegen derzeit meist qualitative Beschreibungen in Form von verbal formulierten Theorien vor. Soweit sich beobachtete Verhaltensweisen auf Einflussfaktoren zurückführen lassen, soll nun eine mathematische Beschreibung erfolgen. Nicht erklärbare oder beweisbare Einflüsse werden im Sinne zufälliger Streuungen zusammengefasst. So lässt sich beispielsweise die Wahrnehmung des Fahrers ohnehin nur äußerst unscharf abbilden, da sich Unterschiede in den menschlichen Eigenschaften ebenso wie Ablenkungen und Schwankungen in der Aufmerksamkeit kaum objektiv erfassen lassen. Das erfordert eine ausreichend große Stichprobe, um dem zufälligen Charakter dieser Einflussgrößen gerecht werden zu können. Auch die Handlungsabsichten bleiben in ähnlicher Weise verborgen. Hier soll der Ansatz verfolgt werden, Handlungsalternativen anhand der äußeren Bedingungen soweit als möglich auszuschließen.

Dieses Vorgehen führt zu der ergebnisorientierten Betrachtung eines mittleren Fahrerverhaltens, ohne die Ursachen der verbleibenden Streuungen im Detail klären zu können und zu wollen. Das beobachtbare Verhalten wird in sogenannten funktionalistischen Input-Output-Modellen oder Black-Box-Modellen abgebildet, deren Parameter über Messungen im realen Verkehr ermittelt werden. Der kausale Zusammenhang der Modelle ist im Rahmen dieser Arbeit für einen Vergleich mit dem ACC-Verhalten und für die Ableitung eines vorzugebenden Sollverhaltens von untergeordneter Bedeutung, wird jedoch hinsichtlich der Plausibilität und Validität der Modelle mitbetrachtet und diskutiert. Auf Basis des modellierten Verhaltens lassen sich ACC und Fahrer miteinander vergleichen und diskutieren. Ziel der Analyse sind Aussagen zur Verbesserung von Sicherheit und Akzeptanz beim Einsatz von ACC.

## **3 Methodik**

### **3.1 Versuchskonzept**

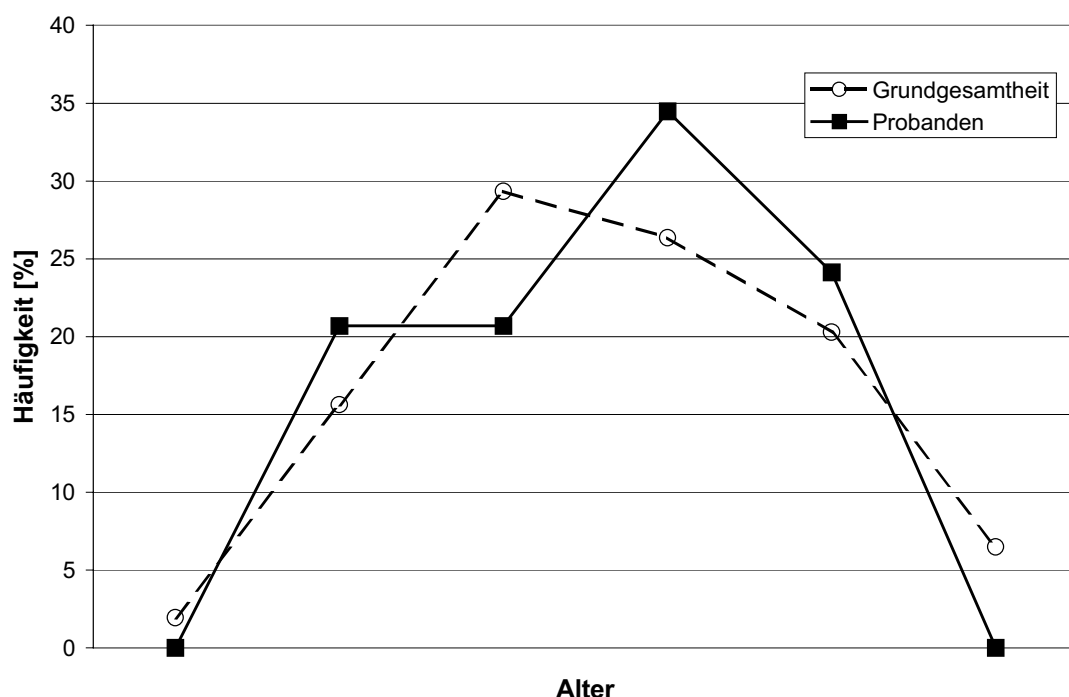
Experimentelle Untersuchungen unter realen Bedingungen im Feld lassen eine natürliche Vielfalt an Situationen erwarten. Es erfolgte eine Aufteilung in zwei Versuchsreihen, in denen die gleichen Fahrer sowohl ohne als auch mit ACC gefahren sind. In der ersten Phase wurde der Prototyp eines ACC lediglich im Hintergrund eingesetzt, um die Abstände zu verschiedenen vorausfahrenden Fahrzeugen messen zu können. Im Mittelpunkt der zweiten Versuchsphase stand die eigentliche Nutzung des ACC, das in der eingesetzten Konfiguration bei BMW in Serie gegangen ist [84]. Alle Fahrten erfolgten ausschließlich bei Tageslicht und trockener Fahrbahn ohne Niederschlag. Der Auftrag an die Fahrer lautete, die vom Versuchsbegleiter vorgegebene Strecke in der für sie gewohnten Fahrweise abzufahren.



Zur Gewöhnung an die Bedienung und Funktion des ACC wurde die beschriebene Versuchsstrecke zu Beginn um einen 23 Kilometer langen Einführungsabschnitt erweitert, der jedoch nicht weiter ausgewertet wurde.

### 3.1.2 Probandenkollektiv

Die Auswahl der Versuchsteilnehmer setzte sich zum Ziel, potentielle Nutzer des zu untersuchenden Systems und typische Fahrer von Fahrzeugen vom Typ des Versuchsfahrzeugs für die Versuche zu gewinnen. So sollten Störeinflüsse infolge einer Gewöhnung an das Fahrzeug vermieden werden. Die Anwerbung der Probanden erfolgte über die örtliche BMW-Niederlassung, die ihre Kunden in einem Schreiben über die anstehenden Versuche informierte. Aus dem Rücklauf der verteilten Fragebögen ergab sich ein Pool potentieller Versuchsteilnehmer. Die Auswahl der Fahrer war dem Gebot der Repräsentativität unterworfen. Diesbezüglich spielte insbesondere das Alter eine wichtige Rolle, wie sich beispielsweise anhand des trotz Sehhilfen signifikant schlechteren Sehvermögens älterer Fahrer herausstellte [1]. Das Kollektiv wurde aus einer geschichteten Stichprobe zusammengesetzt, die in ihrer Altersverteilung der Grundgesamtheit von Fahrern der BMW 5er-Reihe ab Baujahr 1996 möglichst nahe kommen sollte (**Bild 3.2**). Auf die Skalierung des Alters muss aufgrund der Vertraulichkeit der zur Verfügung gestellten Daten an dieser Stelle verzichtet werden.



**Bild 3.2:** Altersverteilungen der ausgewählten Probanden und der Grundgesamtheit von Fahrern der BMW 5er-Reihe ab Baujahr 1996

Eine Klassifizierung der eingesetzten Probanden nach den Kriterien Alter und Fahrerfahrung gibt **Tabelle 3.1** wieder. Darüber hinaus wurde auf eine gleichmäßige Verteilung hinsichtlich

der grundsätzlichen Erfahrungen und aktuellen Gewohnheit im Umgang mit einem konventionellen Tempomaten Wert gelegt (**Tabelle 3.2**).

**Tabelle 3.1:** Altersstruktur und Fahrerfahrung der eingesetzten Probanden

<b>Alter</b> <b>Fahrerfahrung [km]</b>	<b>Jünger</b>	<b>Mittel</b>	<b>Älter</b>	<b><math>\Sigma</math></b>
<b>&lt; 500.000</b>	4	1	1	6
<b>500.000 – 1.000.000</b>	2	5	4	11
<b>&gt; 1.000.000</b>	0	10	2	12
<b><math>\Sigma</math></b>	6	16	7	29

**Tabelle 3.2:** Tempomaterfahrungen der eingesetzten Probanden

	<b>Tempomat</b> <b>im privaten Fahrzeug</b>	<b>Kein Tempomat</b> <b>im privaten Fahrzeug</b>	<b><math>\Sigma</math></b>
Tempomat bereits genutzt	41%	38%	79%
Tempomat noch <b>nie</b> genutzt	0%	21%	21%
<b><math>\Sigma</math></b>	41%	59%	100%

Neben den Auswahlkriterien sind auch individuelle Leistungsbedingungen der Fahrer wie Persönlichkeit und Motivation von Bedeutung, da sie einen großen Einfluss auf das Fahrerverhalten haben [20]. Diese Daten wurden im Rahmen von Fragebögen jeweils vor und nach der Fahrt erhoben und in [1] ausgewertet.

### 3.1.3 Versuchsfahrzeuge

Für die Versuche wurden zwei verhältnismäßig leistungsstarke Fahrzeuge der oberen Mittelklasse und Oberklasse mit ABS und Automatgetriebe eingesetzt. Eine Variation des Fahrzeugtyps war nicht explizit vorgesehen und ergab sich aus dem zeitlichen Ablauf des Projekts und den verfügbaren Entwicklungsständen der eingesetzten Abstandsregelungssysteme. Abgesehen von der Mess- und Videotechnik entsprachen die Ausstattungen der marktüblichen Serie.

In der Versuchsreihe I handelte es sich um einen BMW 530i touring (**Tabelle 3.3**), der über ein Abstandsregelungssystem im Prototypenstatus verfügte.

Die Versuchsreihe II wurde mit einem BMW 740i durchgeführt, dessen ACC in Hard- und Software dem Serienstand bei Markteinführung im Jahr 2000 entsprach [84].

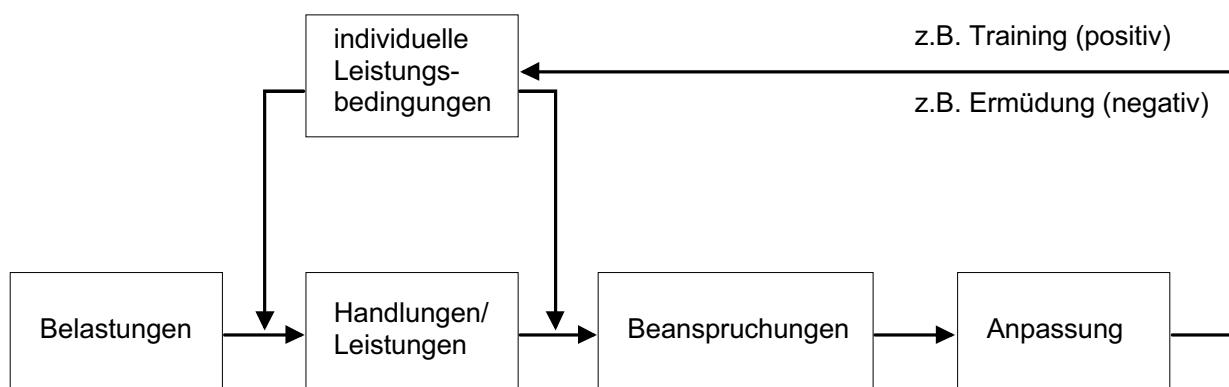
**Tabelle 3.3:** Technischen Daten der Versuchsfahrzeuge aus beiden Versuchsreihen

	<b>Versuchsreihe I</b> <b>(Fahraufgabe ohne ACC)</b>	<b>Versuchsreihe II</b> <b>(Fahraufgabe mit ACC)</b>
<b>Fahrzeugtyp</b>	BMW 530i touring	BMW 740i
<b>Nennleistung</b>	160 kW	210 kW
<b>Nenndrehzahl</b>	5800 1/min	5400 1/min
<b>Hubraum</b>	2997 cm <sup>3</sup>	4398 cm <sup>3</sup>
<b>Leergewicht</b>	1660 kg	1925 kg
<b>Abmessungen</b>	4720 x 1750 x 1420 mm	4985 x 1860 x 1440 mm
<b>Baujahr</b>	1994	1999

### 3.1.4 Messkonzept

Im Allgemeinen dienen Messungen der Beobachtung und Charakterisierung von Vorgängen, die theoretisch durch eine nahezu unendliche Informationsvielfalt gekennzeichnet sind. In der Praxis führen die Gewichtung und Auswahl vermeintlich relevanter Informationen zu einer Aggregation der ursprünglich verfügbaren Daten. Da sich eine solche Abstraktion der realen Verhältnisse nicht mehr umkehren lässt, ist ihr eine große Bedeutung beizumessen. Die Qualität der Aussagen von Messungsanalysen kann nur so gut sein wie das Konzept der Messung selbst.

Die vollständige Berücksichtigung aller Einflüsse auf das Verhalten im Rahmen der Führung von Kraftfahrzeugen lässt sich anhand des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts nach [91] sicherstellen (**Bild 3.3**), wenn auch der sequentielle Charakter eines solchen Ursache-Wirkungs-Gefüges eine starke Vereinfachung der Realität darstellt.

**Bild 3.3:** Belastungs-Beanspruchungs-Konzept [91]



Die Belastungen bezeichnen alle Anforderungen aus der Fahrzeugführung in Verbindung mit den Umgebungsbedingungen, die auf den Fahrer bei der Erfüllung einer Aufgabe einwirken [14]. Das Umfeld kann dazu in die natürlichen, gestalteten und sozialen Bedingungen unterteilt werden, die sich in erster Linie in ihrer Beeinflussbarkeit und zeitlichen Veränderlichkeit unterscheiden. Die Belastungen führen in Abhängigkeit von den individuellen Leistungsbedingungen zu Handlungen und Leistungen des Fahrers. Während die Handlungen unmittelbar die Bedientätigkeiten und das Blickverhalten des Fahrers betreffen, spiegeln sie sich auch indirekt als Leistungen in den Führungsgrößen des Fahrzeugs wider. Das Verhalten des Fahrers bewirkt je nach individuellen Leistungsbedingungen verschiedene Beanspruchungen, die als körperliche Reaktionen auf die Tätigkeit zu verstehen sind. Diese Beanspruchungen führen zu Anpassungen in den individuellen Leistungsbedingungen, die sich wiederum auf die folgenden Handlungen und Beanspruchungen auswirken.

Die geeignete Auswahl der Erhebungsmethoden erfolgte insbesondere unter ökonomischen Gesichtspunkten unter der Voraussetzung der Rückwirkungsfreiheit für alle Verkehrsteilnehmer. Insbesondere kurzfristig veränderliche Bedingungen mussten möglichst kontinuierlich erfasst werden, ohne den Aufwand unverhältnismäßig zu steigern. Eine Systematisierung der relevanten Größen nach ihrer zeitlichen Veränderlichkeit und der darauf basierenden Auswahl der Erhebungsmethoden gibt **Tabelle 3.4** wieder.

Vor Beginn der eigentlichen Versuchsfahrt wurden Persönlichkeits- und Leistungstests sowie Befragungen der Probanden durchgeführt, die neben demografischen Daten Aussagen zur individuellen Risikobereitschaft, Ängstlichkeit, Aufmerksamkeit, Motivation und Sehvermögen liefern sollten [1].

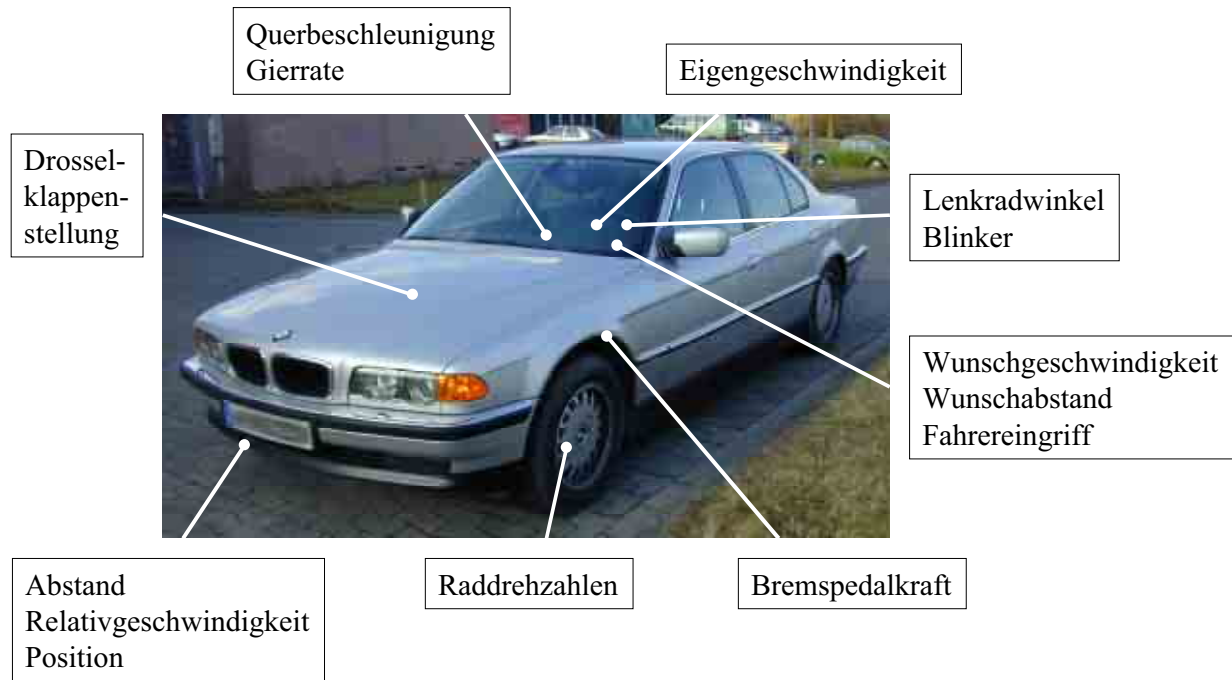
Der Versuchsleiter begleitete die Fahrt als Beifahrer und hatte neben der Bedienung der Messtechnik und der Führung des Fahrtprotokolls die Aufgabe, dem Probanden den Weg zu weisen. Die Kommunikation wurde auf fahrtrelevante Themen beschränkt, um die Probanden nicht von ihrer eigentlichen Fahraufgabe abzulenken.

Im Anschluss an die Versuchsfahrt fand abermals eine Befragung der Probanden statt, um kurzfristige Änderungen der Leistungsbedingungen und Subjektiveurteilungen zu erfassen.

**Tabelle 3.4:** Erhebungsmethoden im Fahrversuch

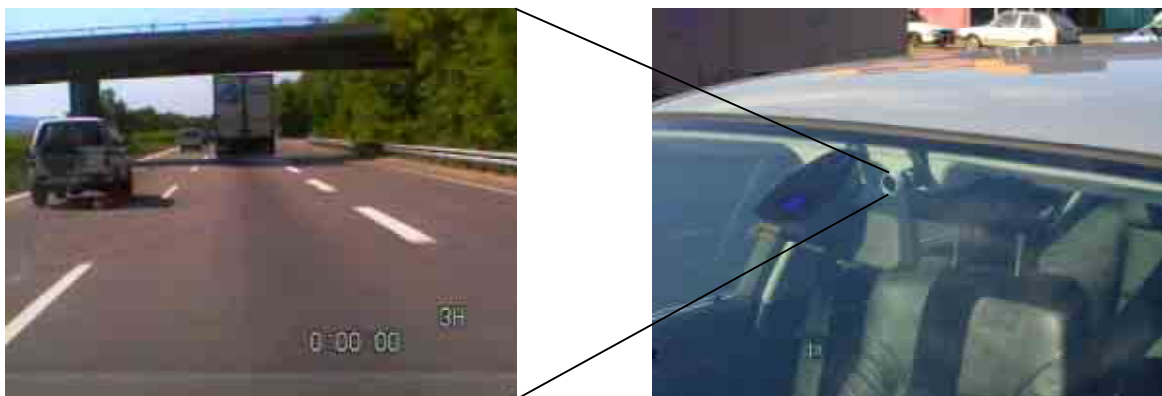
Kategorien	Größen	Zeitliche Veränderlichkeit	Erhebungsmethoden
Belastungen	<i>Natürlich:</i> Witterung Sichtverhältnisse Fahrbahnzustand	Mittelfristig	Protokoll
	<i>Gestaltet:</i> Strecke Fahrzeug	Unveränderlich	Empirisch (d.h. einmalige manuelle Bestimmung eines Datensatzes)
	<i>Sozial:</i> Verkehrsteilnehmer	Kurzfristig	Video Elektronisch
Handlungen/ Leistungen	Bedientätigkeiten Fahrzeugführungsgrößen Blickverhalten	Kurzfristig	Elektronisch Video
Individuelle Leistungsbedingungen	<i>Konstitution:</i> Geschlecht	Unveränderlich	Fragebogen
	<i>Disposition:</i> Alter Persönlichkeit Gesundheitszustand	Langfristig	Fragebogen
	<i>Qualifikation:</i> Fahrerfahrung	Langfristig	Fragebogen
	<i>Anpassung:</i> Eile Müdigkeit Langeweile	Kurzfristig	Fragebogen
Beanspruchungen	Physisch Psychisch (mental, emotional)	Kurzfristig	Befragung

Während der Fahrt lag der Schwerpunkt auf der digitalen Aufzeichnung von Messdaten, was angesichts der großen Datenmengen Vorteile bei der weiteren Verarbeitung und Auswertung bot. Auf diesem Weg wurden neben den fahrdynamischen Größen und Bedientätigkeiten des Fahrers auch die Abstände, Relativgeschwindigkeiten und Positionen der anderen Verkehrsteilnehmer aufgezeichnet (**Bild 3.4**). Die Erfassung der Daten erfolgte mit einer Frequenz von 10 Hz unter Verwendung eines Rechners, der im Kofferraum der Versuchsträger untergebracht war.



**Bild 3.4:** Messtechnische Ausstattung der Versuchsfahrzeuge

Da sich der Aufwand nicht rechtfertigte, alle relevanten Informationen automatisiert zu erfassen, war auch die Beobachtung des Fahrers und der Umwelt zwingend notwendig. Insbesondere der Verkehrsraum und die anderen Verkehrsteilnehmer, wie sie der Fahrer aus seiner Sicht erlebte, spielten eine wichtige Rolle zur Beurteilung der Verkehrssituation (**Bild 3.5**).



**Bild 3.5:** Einbauort und Bildausschnitt der Videokamera

Die synchronisierte Bildaufzeichnung mit der versteckt eingebauten Kamera entlastete den Versuchsbegleiter, so dass auch in komplexeren Situationen sichergestellt war, über alle relevanten Informationen verfügen zu können. Die zwangsläufig notwendige Nachbearbeitung der Videodaten erforderte zwar zusätzlichen Zeitaufwand, ermöglichte jedoch eine differenziertere Betrachtung der Ereignisse.

Eine weitere Entlastung gewährten die bereits im Vorfeld zusammengestellten Streckenmerkmale, da diese unter Beibehaltung der Versuchsstrecke unveränderlich waren. Straßenart, Anzahl der Fahrspuren, Auf- und Abfahrten sowie Geschwindigkeitsbegrenzungen wurden als empirischer Datensatz mit den online im Fahrzeug erfassten Daten gekoppelt.

In Ergänzung der automatischen Erhebungsmethoden wurde vom Versuchsleiter während der Fahrt ein schriftliches Protokoll geführt. Darin wurden besondere Vorkommnisse festgehalten, soweit sie beispielsweise Änderungen der geplanten Witterungs-, Fahrbahn- und Sichtverhältnisse betrafen.

Die individuellen Leistungsbedingungen und Beanspruchungen waren nicht Bestandteil dieser Arbeit. Hinsichtlich ihrer Analyse sei auf [1] verwiesen.

## **3.2 Auswertung**

### **3.2.1 Situationsklassifikation**

Der Straßenverkehr stellt ein komplexes System dar, in dem sich zahlreiche Einflüsse überlagern. Die Beurteilung des Fahrerverhaltens bedarf jedoch der Isolierung einzelner Faktoren, um Abhängigkeiten eindeutig identifizieren zu können. Eine große Bedeutung kommt dabei den anderen Verkehrsteilnehmern zu, deren Verhalten unterschiedlichste Reaktionen beim Fahrer hervorrufen kann.

Der Wunsch nach natürlichen Rahmenbedingungen verbietet, Interaktionen gezielt zu variieren. Die Komplexität und Zufallsabhängigkeit der vielfältigen Beziehungen unter Verkehrsteilnehmern erfordern daher die Definition von Situationsklassen, die Voraussetzung sind, um die Vorgänge während einer Fahrt nach vergleichbaren Bedingungen gliedern zu können.

Existierende Klassifikationsschemata müssen im Zuge der praktischen Anwendung an die Anforderungen angepasst werden. Es müssen Kriterien festgelegt werden, die Beginn und Ende der Situationen eindeutig beschreiben. Dabei spielt die Art und Weise, wie der Fahrer eine Situation erlebt, die ausschlaggebende Rolle. Da hier mit individuell stark unterschiedlichen Ausprägungen zu rechnen ist, die so jedoch nicht erfasst werden können, ist eine möglichst objektive und reproduzierbare Bestimmung der auslösenden und beeinflussenden Momente zu gewährleisten. Auf diese Weise lässt sich eine Versuchsfahrt in einzelne Abschnitte unterteilen, die ausgewertet und verglichen werden können. Darüber hinaus lassen sich die Ergebnisse auf situationsähnliche Abschnitte anderer Fahrten übertragen.

Ausgangspunkt der Betrachtungen sind Zustände, die die Beziehungen zu anderen Verkehrsteilnehmern charakterisieren. Der in gleicher Fahrspur vorausfahrende Verkehr wirkt sich am stärksten auf die eigene Fahrweise aus. Diesbezüglich unterscheidet man zwischen den Zuständen „frei“, gekennzeichnet durch die freie Geschwindigkeitswahl, und „gebunden“, bei dem zwangsläufig ein gewisser Abstand zum Vorausfahrenden einzuregeln ist.

Den Zustandsänderungen liegen Ereignisse als auslösende Momente zugrunde. Der Begriff Situation orientiert sich an der darauf folgenden Reaktion des Fahrers und verdeutlicht eine entsprechende zeitliche Ausdehnung. Die Bezeichnung einer Situation lehnt sich daher an die charakteristischen auslösenden Ereignisse an. Das Situationsende ist erreicht, wenn sich infolge der Reaktion des Fahrers zunächst wieder ein stationärer Zustand hinsichtlich Abstand und Geschwindigkeit eingestellt hat. Darüber hinaus gilt eine Situation als vorzeitig beendet, sobald eine erneute Handlung eines der Beteiligten eine neue Situation auslöst. Damit steht die Situation für einen Fahrtabschnitt, der objektiv definierbare Anforderungen an das Verhalten des Fahrers stellt.

Soweit die Zustände „frei“ und „gebunden“ eingeschwungen sind, d.h. Geschwindigkeit und Abstand relativ konstant bleiben, werden diese Situationen als „Freie Fahrt“ und „Folgefahrt“ bezeichnet. In diesen Fällen bedarf es keiner großen Eingriffe durch den Fahrer bzw. das ACC. Eine vergleichsweise große Bedeutung kommt dagegen dem Übergang von „freier“ zu „gebundener“ Fahrt zu, da der Zeitpunkt der Erkennung eine entscheidende Rolle bei der Situationsbewältigung spielt. Geschwindigkeit und Abstand müssen durch Betätigen von Drosselklappe und eventuell auch Bremse angepasst werden.

Der Abstand zum Vorausfahrenden dient als Kriterium zur Identifikation der auslösenden Ereignisse. Stetigen Änderungen des Abstandes liegt eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei in der gleichen Spur fahrenden Fahrzeugen zugrunde. Diese Situationen wurden mit „Annähern“ und „Zurückfallen“ definiert. Unstetige Änderungen des Abstandes folgen aus eigenen bzw. fremden Spurwechseln. Fremde Spurwechsel werden als „Ein-“, und „Ausscheren“ bezeichnet, was die Beziehung zum eigenen Fahrzeug unterstreicht. Im Falle eigener Spurwechsel bleibt es bei der allgemeinen Bezeichnung „Spurwechsel“.

Die Ereignisse „Spurwechsel“, „Ausscheren“ und „Einscheren“ werden der Einfachheit halber ohne zeitliche Ausdehnung betrachtet, da diese ohnehin sehr gering ist und keinen großen Einfluss auf die weitere Entwicklung der Situation hat. Es wird der Zeitpunkt zugeordnet, zu dem das Fahrzeug das erste Mal die Markierungstreifen zwischen den Fahrspuren berührt.

Die Einteilung der Situationen ist in **Tabelle 3.5** zusammengefasst.

**Tabelle 3.5:** Klassifikationsschema der Situationen

<b>Zustand</b>	<b>Situation</b>
Frei	<u>Freie Fahrt</u>
Gebunden	<u>Folgefahrt</u>
frei=>gebunden	<u>Annähern</u> (an ein fremdes Fahrzeug)
	<u>Einscheren</u> (eines fremden Fahrzeugs)
	<u>Spurwechsel</u> (des eigenen Fahrzeugs)
Gebunden=>frei	<u>Zurückfallen</u> (hinter einem fremden Fahrzeug)
	<u>Ausscheren</u> (eines fremden Fahrzeugs)
	<u>Spurwechsel</u> (des eigenen Fahrzeugs)
Gebunden=>gebunden	<u>Einscheren</u> (eines fremden Fahrzeugs)
	<u>Ausscheren</u> (eines fremden Fahrzeugs)
	<u>Spurwechsel</u> (des eigenen Fahrzeugs)

Wenn auch diese diskrete Betrachtungsweise für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Situationen notwendig ist, so weist sie doch ihre Grenzen auf. Neben der Situation selbst spielen auch die Vorgeschichte und die Antizipation der weiteren Entwicklung eine bedeutende Rolle für das Verhalten. Wird beispielsweise einem Fahrzeug mit der Absicht gefolgt, es bei nächster Gelegenheit zu überholen, so können sich übliche Verhaltensweisen im Laufe der Zeit ändern und es wird eventuell näher aufgefahren. Auch ein beabsichtigter Spurwechsel oder eine vermeintliche Lücke auf der rechten Fahrspur könnte den Fahrer dazu verleiten, den Abstand in Erwartung einer Überholmöglichkeit zu verkürzen. Handlungsalternativen bieten Raum für unterschiedliche Motive, die das Fahrerverhalten und damit auch die weitere Entwicklung der Situation bestimmen. In diesem Zusammenhang muss differenziert werden, dass die Handlungsalternativen des Fahrers weit über die Möglichkeiten des ACC hinausgehen. In dem genannten Beispiel könnten die Fahrer sich drängelnd bemerkbar machen, während ein ACC nur geduldig abwarten kann, bis die vorausliegende Fahrspur als frei erkannt wird.

Vergleichbare Randbedingungen führen also nicht automatisch zu vergleichbarem Verhalten, solange unterschiedliche Motive zugrunde liegen können. Soweit sich solche Motive objektiv erkennen lassen, muss das bei der Beurteilung des Fahrerverhaltens in den entsprechenden Situationen miteinbezogen werden. Es sollte sogar möglichst ausgeschlossen werden, dass der Fahrer mit dem Gedanken gespielt haben könnte, anders als in der praktizierten Form zu reagieren. Die Trennung solcher Motive ist Schwierigkeit und Herausforderung zugleich, da sie einen eklatanten Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse hat. Auf die Motive und ihre Berücksichtigung wird im Rahmen der Analyse der einzelnen Situationen näher eingegangen.

### 3.2.2 Datenaufbereitung

Im Kern drehen sich alle Auswertungen um die räumlich-zeitlichen Bewegungsabläufe der Verkehrsteilnehmer. Dabei stehen die Beziehungen zum Versuchsfahrzeug im Mittelpunkt, die sich anhand von Abständen, Relativgeschwindigkeiten und Fahrspuren hinsichtlich der vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer eindeutig charakterisieren lassen. Diese Daten autonom im Fahrzeug erfassen zu können, ermöglicht der Radarsensor der eingesetzten Abstandsregelungssysteme.

Radarsysteme weisen Einschränkungen auf, die eine nachgeschaltete Verarbeitung der Signale erforderlich machen. Zunächst betrifft dies die Trennung nach Objekten, deren Reflexionen abgesehen vom Abstand und der momentanen Bewegungsrichtung im Raum keine weiteren Aussagen über das Objekt selbst zulassen. Selbst die Größe des Objekts bleibt verborgen, da die Signale keinen Aufschluss darüber geben, an welchem Punkt ein Objekt angemessen wurde. Vorstehende Kanaldeckel und Verkehrsschilder reflektieren Radarwellen gleichermaßen wie Türgriffe oder Radkästen von Fahrzeugen. Daher werden unbewegte Objekte derzeit herausgefiltert, auch wenn stehende Fahrzeuge demzufolge ebenso wenig erkannt werden können.

Aus der eingeschränkten örtlichen Auflösung und dem ungeordneten Empfang von Signalen unterschiedlichen Ursprungs ergibt sich die Schwierigkeit, eine Trennung nach den einzelnen Fahrzeugen vorzunehmen. Diese Aufgabe obliegt einer aufwendigen Signalverarbeitung, die darüber hinaus auch die Fahrspur der erfassten Fahrzeuge relativ zur eigenen bestimmen muss. Dazu wird anhand der Bewegungsgrößen wie Lenkradwinkel, Gierrate und Querbefleunigung der eigene Spurverlauf prognostiziert und mit der absoluten Position der erfassten Fahrzeuge verglichen.

Die Fahrzeug- und Spurerkennung konnte der in der ersten Versuchsphase eingesetzte Prototyp bei dem damaligen Entwicklungsstand nur unbefriedigend bewerkstelligen. Daher wurde auf die Rohsignale des Radarsensors zurückgegriffen und eine eigene Signalverarbeitung programmiert. Zwei Dinge sprachen für dieses Vorgehen. Zum einen musste die nachgeschaltete Signalverarbeitung nicht in Echtzeit funktionieren, da die berechneten Größen lediglich der Auswertung und nicht einer Regelung dienen sollten. Darüber hinaus bot die nachträgliche Verarbeitung der Signale den Vorteil, auch die weitere Entwicklung der Verhältnisse zu kennen, d.h. in die Zukunft blicken zu können. Statt den gefahrenen Kurs prognostizieren zu müssen, konnte er berechnet werden. Unter Berücksichtigung der eigenen Spurwechsel ließ sich dann die Spur der anderen Fahrzeuge relativ zur eigenen Fahrspur exakt bestimmen.

So konnten neben dem in der eigenen Fahrspur direkt vorausfahrenden Fahrzeug auch alle ein- und ausscherenden Fahrzeuge identifiziert werden. Außerdem ließ sich auf der Basis aller Fahrzeuge eine Größe generieren, die der aus Fahrersicht wahrgenommenen Verkehrsdichte in Fahrzeugen pro Kilometer entspricht. Diese Nachbearbeitung der Daten erforderte zwar umfangreichen Programmieraufwand, legte jedoch den Grundstein für eine weitgehend

automatisierte und zeitsparende Auswertung großer Datenmengen bei einer entsprechend guten statistischen Absicherung der Ergebnisse.

Der Versuchsträger der zweiten Versuchsphase stellte die Abstandsrohdaten leider nicht mehr zur Verfügung. Die Signalverarbeitung lieferte lediglich die Abstandsdaten für das Zielfahrzeug, auf das geregelt wurde, und ein sogenanntes potentiell Fahrzeug, das mit größter Wahrscheinlichkeit das nächste Zielfahrzeug werden könnte. Die Qualität der Signale war einwandfrei, so dass eine nachträgliche Bearbeitung nicht notwendig war. Auf die Berechnung der Verkehrsdichte musste jedoch aufgrund der fehlenden Daten zu weiteren Fahrzeugen verzichtet werden.

Während die Abstandsdaten synchron mit den weiteren das Fahrzeug und dessen Bedienung betreffenden Messdaten aufgezeichnet wurden, wurden die Streckenmerkmale einmalig im Vorfeld der Versuche bestimmt und in einer wegabhängigen Datei abgelegt. Sie wurden im Anschluss an die Versuchsfahrt über den zurückgelegten Weg mit den online gemessenen Größen gekoppelt. Die ortsgenaue Zuweisung der Streckenmerkmale wies hierbei einen maximalen Fehler von 0,5 Promille der Streckenlänge auf, was im vorliegenden Fall etwa 100 Metern entsprach.

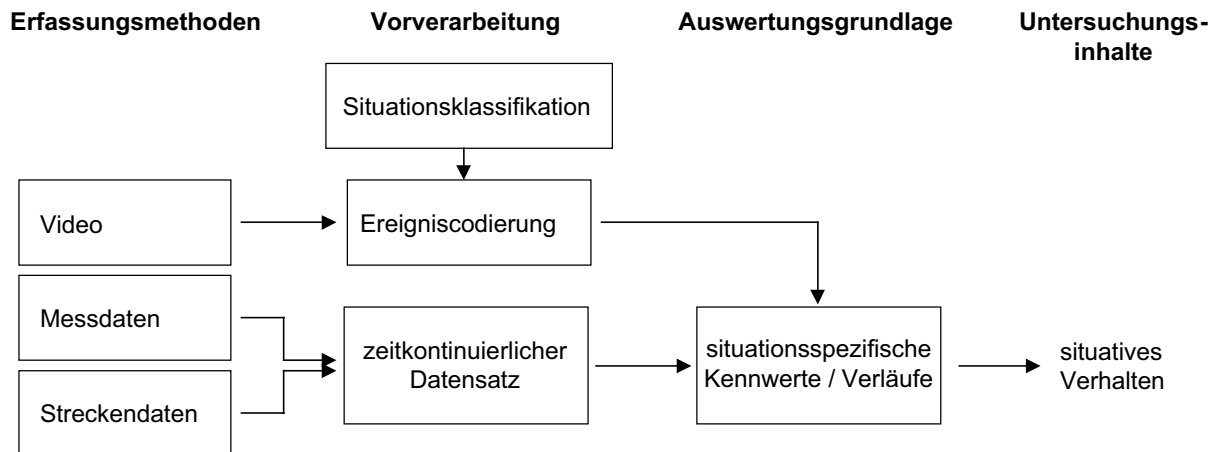
Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag in der detaillierten Analyse von vergleichbaren Situationen. Zunächst galt es, die vordefinierten Situationen in jeder Versuchsfahrt zu identifizieren und zu lokalisieren. Die Suche konnte teilweise noch anhand der Messdaten mit Hilfe programmierter Auswerterroutinen erfolgen. Spätestens jedoch zur Beurteilung der Ursachen und Folgen des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern mussten die Situationen anhand der Videoaufnahmen analysiert werden, da einige relevante Informationen wie beispielsweise optische Signale nur auf diese Weise erschlossen werden konnten. Ferner existierte zum damaligen Zeitpunkt noch keine praktikable Lösung, eigene Spurwechsel während der Versuchsfahrt kontinuierlich erfassen zu können. Auch hier wurde auf die Videoanalyse zurückgegriffen.

In Anbetracht des großen Zeitaufwandes musste die manuelle Auswertung äußerst zielgerichtet erfolgen. Es wurde in einem geschlossenen Arbeitsgang vorgegangen, der jedoch die lückenlose Kenntnis aller zu erfassenden Merkmale voraussetzte. Zu diesem Zweck wurde für jede auszuwertende Situation ein Ablaufplan erstellt, der die theoretische Entwicklung der Vorgänge in Form von alternativen Aktionen zusammenfasste. Auf dieser Basis ließen sich charakteristische Zeitpunkte und relevante Rahmenbedingungen definieren, die den Verlauf einer Situation eindeutig beschreiben. Checklisten stellten die übersichtliche und reproduzierbare Codierung aller Ereignisse sicher, die für die Beurteilung einer Situation von Bedeutung waren. Die Codierung erfolgte mit Hilfe einer speziellen Auswertesoftware, die die codierten Ereignisse einschließlich der zugehörigen Zeiten in einer Ausgabedatei speicherte.

Schließlich entstanden zwei Typen von Dateien, auf denen alle weiteren Auswertungen basierten (**Bild 3.6**). Die zeitsynchrone Kopplung von Messdaten, Streckenmerkmalen und Ergebnissen der Videoanalyse führte zu einem kontinuierlichen Zeitschrieb, der den



kompletten Verlauf jeweils einer Versuchsfahrt mit allen Situationen umfasste. Daneben wurden situationsspezifische Tabellen erstellt, in denen alle benötigten Zeitpunkte, Kennwerte und Situationsmerkmale in einer Gesamtdatei für alle Fahrer zusammengefasst waren, um schließlich das Verhalten getrennt nach unterschiedlichen Situationen untersuchen zu können.



**Bild 3.6:** Übersicht der Arbeitsschritte für die Auswertung

### 3.2.3 Verhaltensmodellierung

Neben der qualitativen Beschreibung der Zusammenhänge von Verhalten und Einflussgrößen ist die quantitative Formulierung der Abhängigkeiten das eigentliche anzustrebende Ziel. In Anbetracht der natürlichen Bedingungen, unter denen die Versuche durchgeführt wurden, sieht man sich auch nach der Einteilung in Situationsklassen noch mit einer hohen Komplexität des Straßenverkehrs konfrontiert. Durch die Überlagerung zahlreicher Einflüsse sind die Verhältnisse von derart zufälliger Natur, dass die isolierte Betrachtung und gezielte Variation jeweils einzelner Einflussfaktoren bei konstanten Rahmenbedingungen unmöglich wird. Daher muss zur Modellierung des Verhaltens ein Ansatz verfolgt werden, der von Beginn an möglichst alle relevanten Größen miteinbezieht. Bleibt eine wichtige Größe unberücksichtigt, findet sich ihr Einfluss in einem scheinbar stärker streuenden Verhalten wieder, das sich um so schwieriger erklären lässt.

Die Problematik einer solchen Vorgehensweise liegt in der Auswahl der einzubeziehenden Größen. Zunächst ist zu bewerten, welche Abhängigkeiten in einem relevanten Ausmaß vermutet werden. Darüber hinaus lassen nur Einflussgrößen, die eine objektive und reproduzierbare Erfassung versprechen, auch einen mathematisch greifbaren Zusammenhang mit dem beobachtbaren Verhalten erwarten. Demzufolge sollen die Auswirkungen mancher Einflüsse als zufällig betrachtet werden, auch wenn sie nicht stochastischer Natur sein mögen. Dies betrifft insbesondere die menschlichen Eigenschaften, die nur begrenzt zugänglich und unter großem Aufwand mit dem beobachtbaren Verhalten zu verknüpfen sind. Situative Einflüsse sind dagegen nicht nur leichter zu erfassen, sondern dürften das Verhalten zunächst

ohnehin dominieren. Ein einscherendes Fahrzeug beispielsweise prägt die Abstände sehr stark und gibt äußere Bedingungen vor, an denen sich das Verhalten mit seinen inter- und intraindividuellen Unterschieden ausrichten muss.

Daher soll das Hauptaugenmerk den situativen Einflussgrößen gelten. Auswirkungen aus unterschiedlichen menschlichen Eigenschaften werden im Rahmen dieser Arbeit als zufällig betrachtet und nicht näher untersucht, zumal sie ohnehin parallel hierzu in [1] behandelt wurden. Über die zwangsläufig auftretenden Streuungen wird angesichts der ausreichenden Versuchsanzahl und –dauer gemittelt. Aufbauend auf dem situationsspezifischen durchschnittlichen Verhalten ist zukünftig auch eine Erweiterung der Modelle um die individuellen Eigenschaften der Fahrer denkbar.

Grafische Analysen stoßen angesichts der genannten Umstände an ihre Grenzen und können allenfalls der Veranschaulichung von Beziehungen zwischen maximal drei Merkmalen dienen. Stattdessen bieten sich statistische Methoden an, von denen die Regressionsanalyse zur Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen metrisch skalierten Merkmalen [13] als am besten geeignet erscheint. Die (nicht-)lineare multiple Regressionsanalyse ermöglicht die Bestimmung mehrdimensionaler Abhängigkeiten auch ohne den gezielten Zugriff auf die unabhängigen Variablen. Die Vielzahl an Einflussgrößen erfordert jedoch auch hier eine sinnvolle Beschränkung, um mit Rücksicht auf die nur begrenzt verfügbaren Datenmengen statistisch abgesicherte Ergebnisse zu gewährleisten.

Daher wurden zunächst auf theoretischer Ebene die Einflussgrößen bestimmt, denen eine signifikante Bedeutung beigemessen wurde. Die Theorie lieferte jedoch nur in seltenen Fällen konkrete Hinweise über die mathematische Form der Beziehungen. Die Formulierung von Hypothesen konnte im allgemeinen nur aus empirischen Beobachtungen gewonnen werden, wozu dann doch grafische Verfahren herangezogen werden mussten.

Während sich eine einzelne unabhängige Größe noch kontinuierlich darstellen ließ, wurden alle weiteren Größen in Klassen eingeteilt und innerhalb der gewählten Bandbreiten als konstant betrachtet. Ansonsten wäre die Anzahl an Situationen mit vergleichbaren Randbedingungen zu klein gewesen. Auf diese Weise erhielt man Punktwolken, deren tendenzielle Verteilungen eine grobe Überprüfung der Plausibilität einer Hypothese ermöglichten und Aussagen zum Funktionstyp erlaubten. Das iterative Nachbessern der Hypothese und die grafische Kontrolle führten zur Formulierung einer mathematischen Funktion, durch die sich die bestehenden Abhängigkeiten beschreiben lassen sollten.

Die diskrete Beschreibung des Verhaltens mit charakteristischen Kennwerten ist sicherlich geeignet, verschiedene Verhaltensweisen bei einem überschaubaren Aufwand zu vergleichen. So ist es z.B. denkbar, einen Verzögerungsverlauf anhand der durchschnittlichen und maximalen Verzögerung sowie der Verzögerungsdauer zu charakterisieren. In manchen Fällen ist jedoch die Reduktion kontinuierlicher Zeitverläufe auf diskrete Kennwerte nicht zielführend, da komplizierte Zeitverläufe ohne Informationsverluste so kaum nachzubilden sind. Insbesondere hinsichtlich der späteren Abbildung im ACC sollten daher zeitliche

Verläufe, beispielsweise der Abstand zu einem einscherenden Fahrzeug, auch kontinuierlich modelliert werden.

Dazu bietet sich die Methode der experimentellen Analyse an [58]. Auf diesem Wege lässt sich eine gesuchte Ausgangsgröße in Abhängigkeit von verschiedenen Eingangsgrößen mathematisch formulieren, ohne dass ein funktionaler Zusammenhang bekannt sein muss. Die allgemeine Grundgleichung einer solchen Parameterschätzfunktion entspricht in ihrem Aufbau:

$$A(t) = P_1 \cdot E_1(t) + P_2 \cdot E_2(t) + \dots + P_n \cdot E_n(t) \quad (7)$$

Sowohl die zeitabhängige Ausgangsgröße  $A(t)$  als auch die zeitabhängigen Eingangsgrößen  $E_i(t)$  müssen messbar sein. Die freien Parameter  $P_i(t)$  dienen der Anpassung der berechneten Ausgangsgröße  $A(t)$  an die gemessenen Werte. Damit entspricht der Ansatz der Systemanalyse weitestgehend der Regressionsanalyse, verzichtet jedoch im Gegensatz dazu auf einen konstanten Term, der im einfachen Fall einer einzigen Eingangsgröße dem y-Achsenabschnitt entspräche. In ihrer mathematischen Behandlung sind die kontinuierlichen Modelle den diskreten Modellen gleichzusetzen.

Die eigentliche Herausforderung lag in der Ermittlung einer geeigneten Funktion, dem Regressionsansatz [4] bzw. der Parameterschätzfunktion [58]. Die Bestimmung der Regressionskoeffizienten bzw. freien Parameter war nur noch eine Frage der Optimierung am Rechner und erfolgte off-line in Blockverarbeitung. Das Ziel war es, einen stabilen Parametersatz für alle zugehörigen Situationen zu finden, der außerdem eine ausreichende Modellgüte garantieren sollte.

Zur Bewertung der Ergebnisse wurden die Abweichungen zwischen Berechnung und Messung analysiert und das Bestimmtheitsmaß sowie die Standardabweichung ermittelt. Das Bestimmtheitsmaß wird als Erklärungsbeitrag bezeichnet und gibt an, welcher Anteil der gesamten Streuungen sich mit den zugrunde gelegten unabhängigen Variablen erklären lässt. Dagegen beschreibt die Standardabweichung die verbleibenden mit der Funktion nicht erklärbaren Abweichungen. Eine anschauliche Interpretation der Qualität der Ergebnisse und ihrer praktischen Relevanz liefern abschließend die Häufigkeitsverteilungen der Abweichungen.

Zur Überprüfung, dass die anhand der Stichprobe ermittelten Zusammenhänge auch für die Grundgesamtheit signifikant sind, wurde der partielle F-Test nach [13] angewendet.

### 3.2.4 Sicherheitsanalyse

Die Untersuchung der Sicherheit eines Abstandsregelungssystems soll berücksichtigen, welche Potentiale und welche Nebenwirkungen sich aus dem Einsatz solcher Systeme ergeben. Da Unfallanalysen im Vorgriff auf zukünftige Entwicklungen keine befriedigenden Aussagen erlauben, werden die Auswirkungen im realen Fahrbetrieb beurteilt. Aus den in Kap. 2.2.4

vorgestellten weitgehend auf theoretischen Überlegungen basierenden Modellen und Methoden soll ein praktisch anwendbares Vorgehen abgeleitet werden.

Zunächst müssen Indikatoren definiert werden, die die Sicherheit für den vorliegenden Anwendungsfall beschreibbar, messbar und quantifizierbar gestalten. Auch wenn der Unfall selbst nicht als Indikator in Frage kommt, lässt er doch Rückschlüsse auf die Pre-Crash-Phase zu. Unfälle lassen sich grob in zwei charakteristische Typen gliedern, das unkontrollierte Verlassen der Sollspur und die Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer.

Kollisionen stehen im direkten Zusammenhang mit dem Längsführungsverhalten, dessen Beurteilung im Mittelpunkt steht. Daher liegt es nahe, aus der Menge der potentiellen Beobachtungskriterien den Abstand als die ausschlaggebende Größe herauszugreifen. Dabei bleibt unbestritten, dass eine von der Spurhaltung entkoppelte Betrachtung eine Vereinfachung der realen Zusammenhänge bedeutet [66]. Schließlich führt ein kleiner Abstand nicht zwangsläufig zu einem Unfall, solange noch die Möglichkeit zum Ausweichen besteht. Die Kopplung von Längs- und Querregelung kann allerdings vernachlässigt werden, solange ausschließlich kontrollierte Bremsmanöver betrachtet werden und Ausweichmanöver keine Rolle spielen [59]. In diesen Fällen lässt sich vom Abstand auf die momentanen Sicherheitsreserven schließen.

Die Bewertung der Sicherheit erfolgt in einem Vergleich der Fahrtätigkeit mit und ohne ACC. Dazu werden zwei unabhängige Wege beschritten. Zunächst wird das Verhalten von Fahrer und ACC in ausgewählten für sicherheitsrelevant erachteten Situationen einander gegenübergestellt. Abstände bei vergleichbaren charakteristischen Bedingungen quantifizieren das Risiko, während Häufigkeit und Dauer der Situationen ein zeitliches Expositionsmaß darstellen, wie lange die Fahrer diesem Risiko ausgesetzt sind. Diese ursachenorientierte Betrachtungsweise kann konkrete Ansätze für Verbesserungen aufdecken.

Ergänzend bezieht ein am Systemgedanken ausgerichtetes Vorgehen das Zusammenspiel von Fahrer und ACC mit ein. Rückwirkungen auf den Fahrer sind insbesondere hinsichtlich seiner Übersteuerungen und Eingriffe in den ACC-Betrieb von Interesse, die zu einem Gesamtverhalten führen, das es unter dem Sicherheitsaspekt objektiv zu beschreiben gilt. Dazu ist die bisherige strikte Trennung aufzulösen, ob der Fahrer oder das ACC eine Situation bewältigt haben. Gleichzeitig soll eine Ausweitung der Situationen eine breitere Beurteilung der Sicherheit erlauben, die jedoch auf Kosten der direkten Vergleichbarkeit der Verhältnisse geht. Die Vergleichbarkeit der Fahrten mit und ohne ACC ist dennoch gewährleistet, wenn man von einem zufälligen Auftreten fremdinitiiertter Ereignisse, z.B. Einscheren fremder Fahrzeuge, ausgeht, die bei dem zeitlichen Umfang der Untersuchungen von jeweils 60 Stunden ähnliche statistische Verteilungen aufweisen dürften.

In diesem Fall stellt der Abstand allein kein geeignetes Bewertungsmaß für Sicherheit dar, da er in Unkenntnis der exakten Randbedingungen keinen Rückschluss auf das Kollisionskriterium zulässt. Hier sind dynamische Größen wie Geschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit miteinzubeziehen. Legt man die Betrachtungsweise nach dem

Interaktionsmodell von [43] (Bild 2.6, S. 23) zugrunde, so lassen sich den Sicherheitszuständen „Fehler“ und „Konflikt“ zwei gängige charakteristische Kenngrößen [23,41] als Indikatoren zuordnen:

$$\text{Zeitlücke:} \quad t_z = \frac{\text{Abstand}}{\text{Geschwindigkeit}}$$

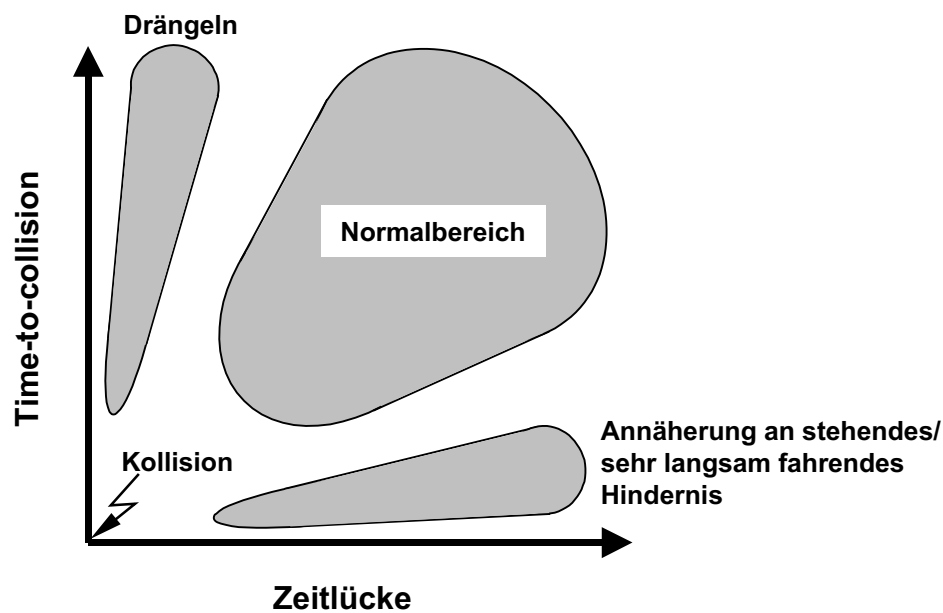
$$\text{Time-to-collision:} \quad ttc = \frac{\text{Abstand}}{\text{Relativgeschwindigkeit}}$$

Die Zeitlücke gibt an, in welcher Zeit man den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zurückgelegt hat. Sie entspricht damit einer verfügbaren Reaktionszeit, in der man, gleiche Geschwindigkeit und Verzögerung vorausgesetzt, auf Geschwindigkeitsänderungen des Vorausfahrenden reagieren muss. Die Zeitlücke soll als Indikator für den Fehlerzustand dienen. Fehler werden üblicherweise als Abweichungen von einem Soll verstanden, wobei diese diskrete Fehlerdefinition häufig deshalb notwendig wird, um Fehler einer Beobachtung überhaupt zugänglich zu machen [87]. Diese Schwierigkeit existiert im vorliegenden Fall nicht. Die Quantifizierung kann anhand zeitlicher Häufigkeiten erfolgen, deren Vergleich für die Fahrtätigkeit mit und ohne ACC eine relative Bewertung der Sicherheit erlaubt. Daher wird die Zeitlücke als kontinuierlicher Fehler skaliert.

Die Time-to-collision stellt ein zeitliches Maß dar, wann es unter Beibehaltung der momentanen Geschwindigkeitsverhältnisse und Fahrkurse zu einer Kollision kommt. Unter der diskutierten Vernachlässigung von Ausweichmanövern im kontrollierten Fahrbetrieb lässt sich dieser Wert direkt zur Bemessung von Konflikten verwenden.

Ausgangspunkt der weiteren Betrachtungen bildet das angesprochene Interaktionsmodell nach [43]. Legt man zugrunde, dass Unfälle und Beinaheunfälle glücklicherweise nicht aufgetreten sind, dann decken Fehler und Konflikte die vollständige Beschreibung der Sicherheit ab. Auf den Handlungsablauf in kritischen Situationen nach [19] (Bild 2.5, S. 22) angewandt, spiegeln Fehler latente Gefahren wider, und Konflikte bezeichnen den durch Störgrößen ausgelösten Zustand, in dem nur durch richtiges Eingreifen eine weitere Verkleinerung des Stabilisierungsraumes vermieden werden kann.

In Kombination beider Modellvorstellungen lässt sich hier ein zweidimensionaler Sicherheitsraum einführen, in dem Zeitlücke und Time-to-collision den momentanen Gefährdungszustand festlegen (**Bild 3.7**). Der Vergleich der einzelnen Gefährdungszustände und ihre zeitliche Häufigkeit liefern Maße zur Bewertung der Sicherheit.



**Bild 3.7:** Modellvorstellung des zweidimensionalen Sicherheitsraumes bestehend aus Zeitlücke und Time-to-collision

Auf der Abszisse ist die Zeitlücke aufgetragen, die das latente Gefahrenniveau bestimmt. Kleine Werte stehen dabei für kleine Sicherheitsreserven. Das stellt soweit noch keine direkte Gefahr dar, solange nicht weitere Störgrößen auftreten und den stabilen Zustand aus dem Gleichgewicht bringen. Dagegen drückt die Time-to-collision eine akute Gefahr aus. Ohne ein Eingreifen würde es unter den gegebenen Verhältnissen zu einem Unfall kommen. Im Normalfall kann davon ausgegangen werden, dass, je niedriger die Werte sind, um so wahrscheinlicher in diesem Moment bereits eine Reaktion erfolgt. Kleine Time-to-collision können also aus einer beabsichtigten Handlung resultieren und müssen keine direkte Gefährdung bedeuten. Dennoch stehen sie für ein höheres Gefahrenniveau, da nun im Falle einer Störung des Ablaufs noch weniger Spielraum zur Stabilisierung des Systems verbleibt. Der Nullpunkt kennzeichnet das Unfallkriterium. Die Achsen können nicht belegt sein, da jede Abnahme des Abstandes bis hin zum Unfall asymptotisch in den Ursprung führt.

Hinsichtlich sicherer Zustände sind höhere Time-to-collision-Werte größeren Zeitlücken tendenziell vorzuziehen. Dass dies selbstverständlich nur in Grenzen Gültigkeit hat, illustriert im Extremfall das Drängeln mit unendlichem Time-to-collision und gegen Null strebender Zeitlücke (Bild 3.7). Der gegensätzliche Extremfall kann mit einer Annäherung an ein Stauende verglichen werden.

### 3.3 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Abstandsverhalten auf Autobahnen mit und ohne Nutzung eines ACC untersucht. Der Ansatz verfolgte das Ziel, das Verhalten des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug-Umgebung im öffentlichen Straßenverkehr repräsentativ und objektiv zu erfassen. Es fanden insgesamt 50 Fahrten von 120 Stunden Gesamtdauer auf ausgewählten

Versuchsstrecken statt, die hinsichtlich relevanter Merkmale wie Straßenart, Spuranzahl und Tempolimit analysiert wurden. Die Probanden waren den eingesetzten Fahrzeugtyp zur Vermeidung von Gewöhnungseinflüssen auch privat gewohnt und wurden gezielt nach der typischen Verteilung von Alter und Fahrleistung ausgewählt. Dabei wurde auf eine gleichmäßige Verteilung mit und ohne Tempomaterfahrung Wert gelegt. Der Versuchsträger war neben Videotechnik zur Aufnahme der Verkehrssituation mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, die die Erfassung der Bedientätigkeiten des Fahrers, der fahrdynamischen Größen und der Abstände und Relativgeschwindigkeiten zu vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern gestattete.

Aus Gründen der Komplexität der Verkehrsvorgänge wurden die Situationen zunächst nach vergleichbaren Anforderungen an die Fahrtätigkeit und Ursachen für das Verhalten klassifiziert. Die Einstufung erfolgte u.a. anhand der Videoaufnahmen, die in Verbindung mit den Fahrzeugdaten auch der Bestimmung von charakteristischen Zeitpunkten und relevanten Kennwerten dienten. Auf dieser Grundlage lässt sich das Abstandsverhalten für verschiedene Situationen modellieren. Den Modellen liegt zugrunde, dass sich bestimmte Einflussgrößen linear und nicht-linear überlagern lassen. Weitere Einflüsse, die in verbleibenden und im Rahmen dieser Arbeit nicht näher zu erklärenden Streuungen des Verhaltens verborgen bleiben, werden als zufällig betrachtet und anhand einer Regressionsanalyse gemittelt.

Die Verhaltensmodellierung erlaubt, Fahrer und ACC zunächst in ausgewählten für sicherheitsrelevant erachteten Situationen einander gegenüberzustellen. Ergänzend gilt es, auch den Umgang mit ACC zu analysieren, inwieweit sich Rückwirkungen auf den Fahrer im sicherheitsrelevanten Verhalten wiederfinden. Dazu werden Zeitlücke und Time-to-collision als geeignete Indikatoren identifiziert, gemeinsam eine objektive Beurteilung des Abstandsverhaltens zu ermöglichen.

## **4 Ergebnisse**

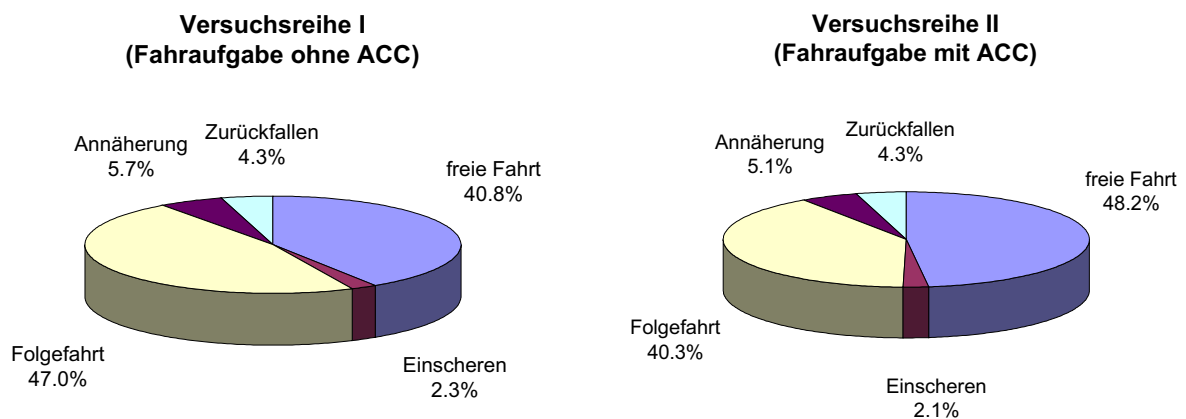
### **4.1 Bedeutung der Situationen**

Bevor auf die verschiedenen Situationen im Detail eingegangen wird, soll zunächst ihre Bedeutung für die Fahrtätigkeit auf Autobahnen analysiert werden. Der Definition von Situationsklassen lag bereits zugrunde, dass Situationen unterschiedliche Anforderungen an das Verhalten von Fahrer und ACC stellen. Die Beurteilung des Verhaltens muss vor dem Hintergrund erfolgen, wie häufig solche Situationen überhaupt auftreten.

Wie bereits in Kap. 3.2.4 erläutert wurde, ist Risiko sowohl der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens als auch der Folgeschwere proportional. In diesem Zusammenhang sind die Zeitanteile der Situationen als Expositionsmaße zu verstehen, worauf die situationsspezifischen Gefahren zu beziehen sind. Eine ähnliche Betrachtungsweise spielt auch unter dem Aspekt der Akzeptanz von ACC eine Rolle. Häufige Situationen genießen sicher einen höheren Stellenwert als sporadisch auftretende Exoten, obwohl auch seltene

herausragend negative Erscheinungen wie beispielsweise ausbleibende Bremsungen infolge einer Fehlerkennung von Objekten ein Gesamtbild empfindlich stören können [98].

Schließlich ist es auch aus Gründen der Vergleichbarkeit der beiden Versuchsreihen mit und ohne ACC von Interesse, welche zeitlichen Anteile die einzelnen Situationen an den Versuchsfahrten haben. Anhand der Situationsklassifikation nach Kap. 3.2.1 ist zu jedem Zeitpunkt eine eindeutige Zuordnung der Verkehrsverhältnisse zu einem bestimmten Situationstyp möglich. Demzufolge lassen sich die Fahrten komplett nach Situationen zerlegen (**Bild 4.1**).



**Bild 4.1:** Zeitliche Verteilung der Situationen in beiden Versuchsreihen (Gesamtdauer jeweils ca. 60 Stunden)

Die Versuchsfahrten mit ACC sind durch größere Anteile an freier Fahrt gekennzeichnet, während die Anteile der Situationen unter Beteiligung anderer Verkehrsteilnehmer in gleichem Maße abnehmen. Die Versuche fanden zu den gleichen Tageszeiten mit den gleichen Fahrern statt, wobei Ferienzeiten vermieden werden konnten. Trotzdem lassen annähernd gleiche Geschwindigkeitsverteilungen vermuten, dass die Fahrer in der zweiten Versuchsreihe mit einer niedrigeren Verkehrsdichte konfrontiert wurden. Die unterschiedliche Zusammensetzung der Fahrten muss daher im Rahmen der weiteren Untersuchungen berücksichtigt werden.

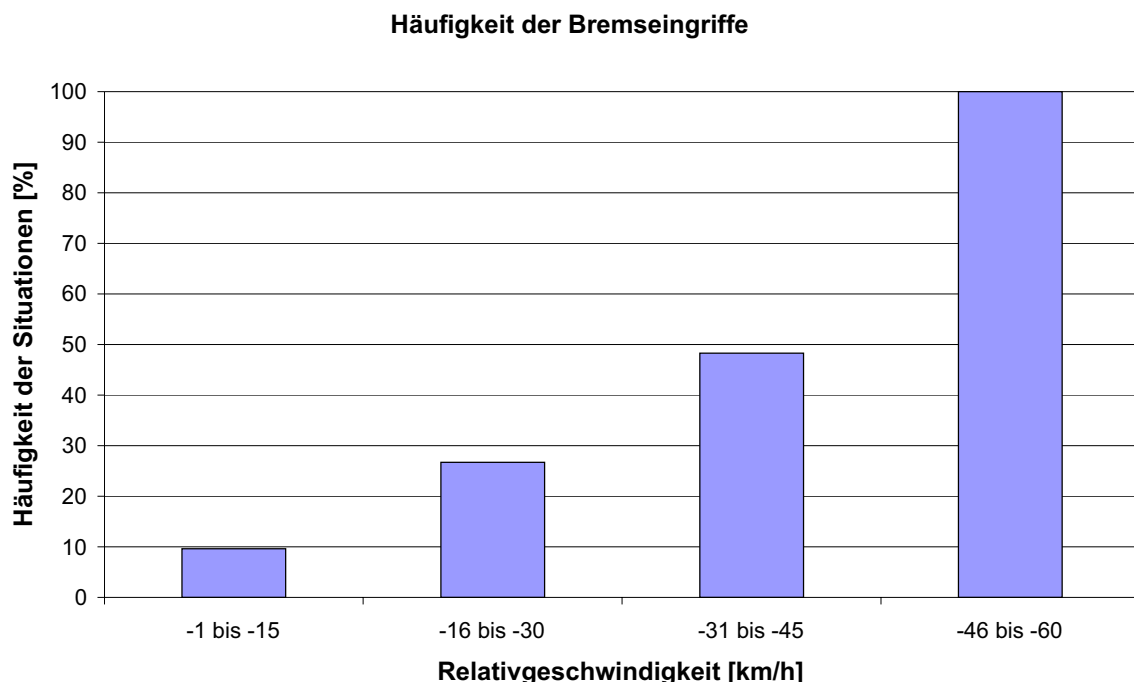
Die überwiegenden Zeitanteile der Fahrten bestehen aus Folgefahrt und freier Fahrt. Diese Zustände sind durch vergleichsweise konstante Geschwindigkeiten und Abstände gekennzeichnet, deren Änderungen weitestgehend mit großen Zeitkonstanten erfolgen. Gleiches trifft auf das Zurückfallen hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug zu, was von den Anforderungen her eher der freien Fahrt zuzuordnen ist. Nähert man sich einem langsameren Fahrzeug an, gewinnen die Änderungen der Verhältnisse an Dynamik und eine Reaktion muss unbedingt erfolgen. Aber auch diese Situationen sind meistens frühzeitig erkennbar und können in Ruhe eingeregelt werden. In 80 Prozent der Fälle kommt es erst gar nicht zu einer vollständigen Anpassung der Geschwindigkeit an den Vorausfahrenden, da dieser vorher ausschert oder man selbst einen Spurwechsel zum Überholen durchführt. Der niedrige Anteil



an Annäherungen, die in einer Folgefahrt enden, mag kaum verwundern. Verkehrsverhältnisse, die Annäherungen überhaupt ermöglichen, gehen meistens mit niedrigen Verkehrsdichten einher. Dieser Umstand erlaubt jedoch in vielen Fällen auch relativ schnell ein Ausscheren oder einen eigenen Spurwechsel zum Überholen.

Während eigene Spurwechsel kaum unvorbereitet stattfinden, sind die Spurwechsel anderer Fahrzeuge fremd initiiert und entsprechend spät absehbar. Die Absicht wird mitunter erst mit der Durchführung erkannt. Der kritischere Fall ist in diesem Zusammenhang zweifelsfrei das Einscheren eines langsameren Fahrzeugs. Das Risiko liegt auf einem höheren Niveau, da es ohne ein Eingreifen zwangsläufig zu einer Kollision kommen würde. Außerdem ist das verfügbare Zeitfenster, in dem die Reaktion erfolgen muss, im Vergleich zu anderen Situationen deutlich kleiner.

Demzufolge stellt das Einscheren von langsameren Fahrzeugen die größten Anforderungen an Fahrer und ACC. Die in den Versuchen mit ACC-Einsatz ermittelte Eingriffshäufigkeit der Fahrer (**Bild 4.2**) unterstreicht die Notwendigkeit, die Zusammenhänge in Einschersituationen näher zu untersuchen. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit des einscherenden Fahrzeugs trauten die Fahrer dem ACC immer seltener zu, die Situation zu ihrer Zufriedenheit bewältigen zu können. War der Einscherende mehr als 45 Kilometer pro Stunde langsamer, griffen die Fahrer in 100 Prozent der Fälle ein.



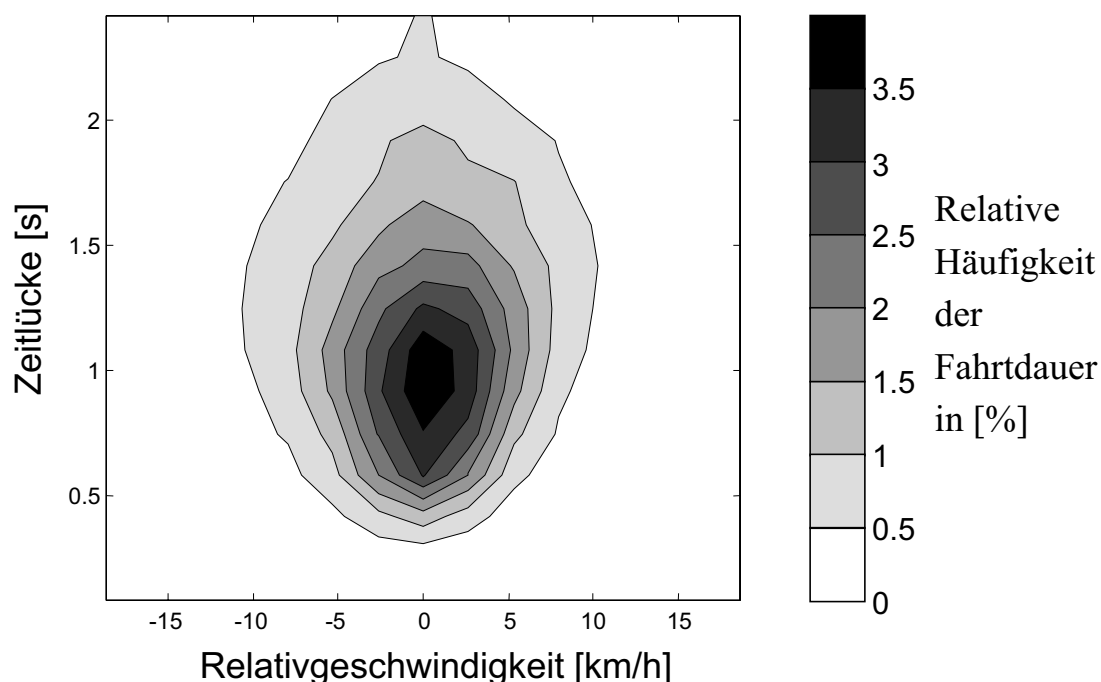
**Bild 4.2:** Häufigkeit der Bremseingriffe durch den Fahrer bei ACC-Einsatz in Einschersituationen (N=416)

## 4.2 Fahrerverhalten

### 4.2.1 Folgefahrt

Die Folgefahrt ist durch ein Fahrzeug gekennzeichnet, das in der eigenen Spur vorausfährt. Der Fahrer ist gezwungen, dem Vorausfahrenden in dessen Geschwindigkeit zu folgen. Es handelt sich in den zu betrachtenden Fällen idealerweise um einen eingeschwungenen Zustand, d.h. der Abstand bleibt relativ konstant. Ein Überblick über alle Fahrten ohne ACC lieferte Hinweise zur Eingrenzung der Folgefahrt, da nach Bild 4.1 (S. 48) alle weiteren Situationen, die ebenfalls einen Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug aufweisen, einen vergleichsweise geringen Anteil stellen.

Betrachtet man die Verteilung der aufgetretenen Relativgeschwindigkeiten und Zeitlücken, lässt sich für eine Relativgeschwindigkeit von 0 km/h und eine Zeitlücke von ca. 1 s die größte relative Häufigkeit ablesen (**Bild 4.3**). Die zweidimensionale Überlagerung der beiden einzelnen Häufigkeitsverteilung führt zu elliptischen Verläufen, die identische relative Häufigkeiten repräsentieren. So ließ sich aus den Versuchen ermitteln, dass sich die Fahrer bei Folgefahrten in einem Relativgeschwindigkeitsbereich von  $\pm 10$  Kilometern pro Stunde bewegen. Ferner konnte aufgezeigt werden, dass die Zeitlücken bei maximal 2,5 Sekunden liegen und Werte von 0,3 Sekunden nicht unterschreiten.

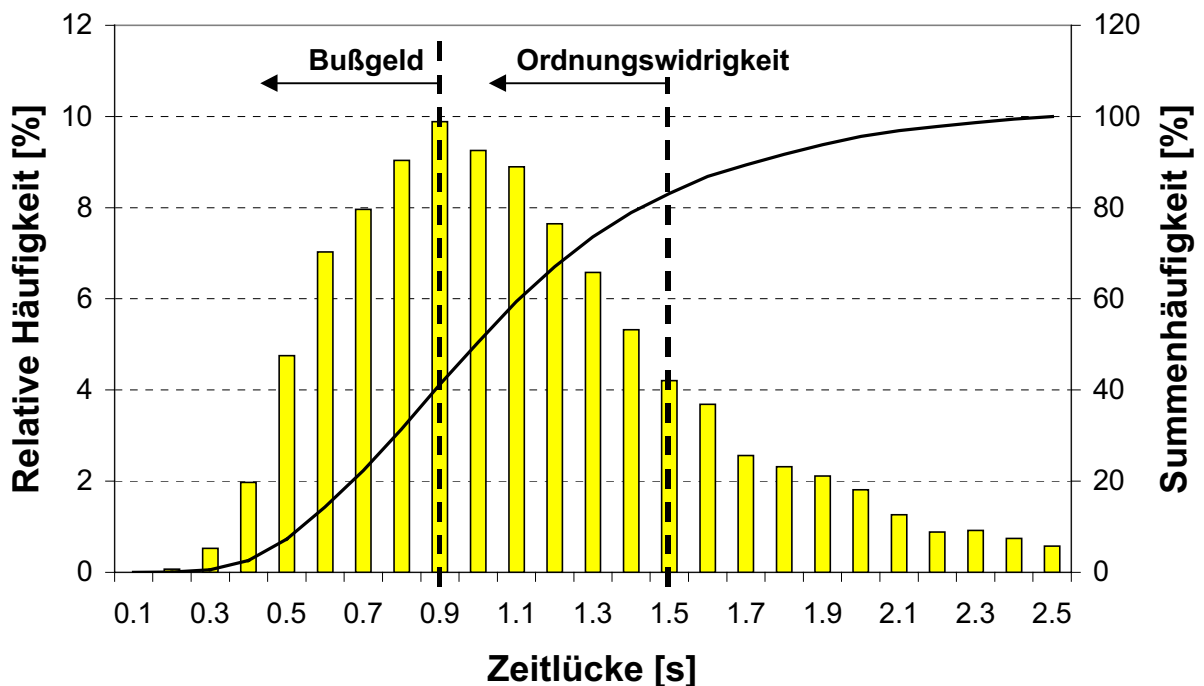


**Bild 4.3:** Relative Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von Zeitlücke und Relativgeschwindigkeit für die gesamte Versuchsreihe I (Fahraufgabe ohne ACC)

Die weitere Auswertung beschränkte sich jedoch aus praktikablen Gründen auf  $\pm 3$  Kilometer pro Stunde, was angesichts der Häufigkeit von Folgefahrten kein Problem darstellte. So ließen sich Störeinflüsse vermeiden, die durch ein Verkürzen der Abstände auftreten, um

beispielsweise noch vor dem Ausscheren bereits mit der antizipierten Absicht zu beschleunigen oder um auf der linken Spur fahrend auf der rechten Spur Fahrende am Einscheren zu hindern. In ähnlicher Weise wird auch zur Einleitung eigener Überholmanöver noch vor dem Spurwechsel beschleunigt. Solche Bedingungen wurden ausgeschlossen, indem nur Folgefahrten auf der äußerst linken Spur mit der genannten geringen Relativgeschwindigkeit untersucht wurden. Im Normalfall werden die rechten Spuren ohnehin nur befahren, wenn die Verkehrsverhältnisse auch dort die gewünschte Geschwindigkeit zulassen, oder dem nachfolgenden Verkehr die Möglichkeit zum Überholen gegeben werden soll. So oder so entspricht eine Fahrt auf diesen Spuren nicht der typischen Folgefahrt im definierten Sinne. Aufgrund der vielfältigen Einflüsse auf das Fahrerverhalten beschränken sich die Betrachtungen auf zweispurige Autobahnen, zumal weitere Fahrspuren nur in Ausnahmefällen einen Einfluss auf das Abstandsverhalten haben dürften. Weitere Einschränkungen betreffen die Geschwindigkeit, die zum Ausschluss von stauähnlichen Verhältnissen über 60 km/h liegen muss. Die begrenzte Reichweite des Radarsensors ist in dem betrachteten Geschwindigkeitsbereich als ausreichend zu bezeichnen.

Entsprechend den genannten Voraussetzungen stellt **Bild 4.4** die zeitliche Häufigkeitsverteilung der ermittelten Zeitlücken, den Quotienten aus Abstand und eigener Geschwindigkeit, für die Summe aller Fahrer dar.

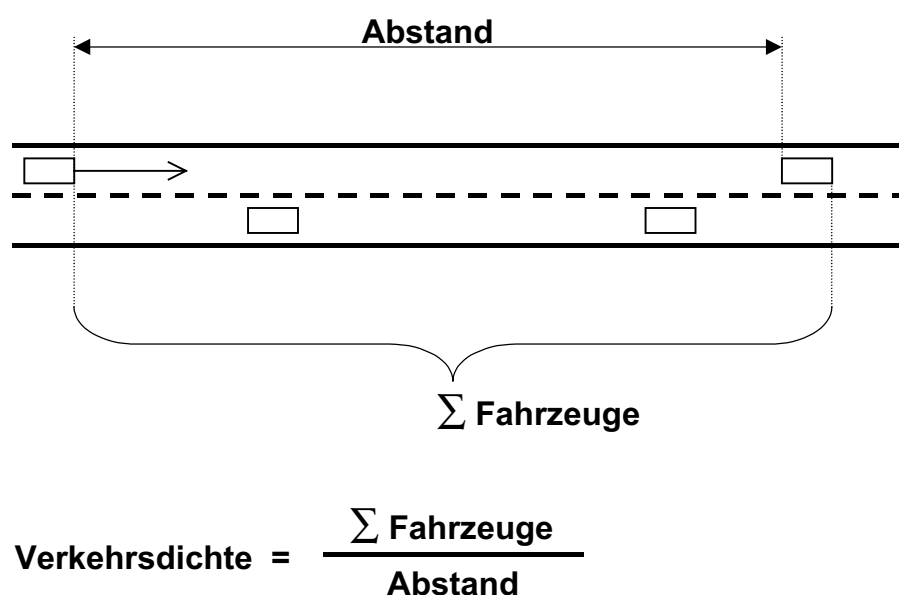


**Bild 4.4:** Zeitliche Häufigkeit der Zeitlücken bei Folgefahrt für die Fahrer (Gesamtdauer ca. 9 Stunden bei 24 Fahrern)

Statt einer Gaußkurve zeigt sich eine leicht asymmetrische Verteilung. Beobachtungen von [76] und [99], dass der Fahrer im Falle abnehmender kleiner Abstände eine höhere Aufmerksamkeit und Reaktionsbereitschaft aufweist und sich schneller aus der Gefahrenzone entfernt, lassen sich daran nicht festmachen. Vielmehr dürften in den betrachteten Situationen trotz aller Einschränkungen sicherlich auch Abschnitte enthalten sein, in denen einem weit voraus fahrenden Fahrzeug eher zufällig mit der gleichen Geschwindigkeit gefolgt wurde, ohne den Abstand tatsächlich darauf zu regeln. Dies ließ sich auswertetechnisch leider nicht vermeiden. Doch trotz dieser Einschränkungen unterschreiten die Fahrer noch in 41 Prozent der Zeit den für Bußgelder zugrunde gelegten Mindestabstand von 0,9 Sekunden. Abgesehen davon liegen sie in 83 Prozent unter dem vorgeschriebenen Sicherheitsabstand von 1,5 Sekunden.

Damit drängt sich die Frage auf, warum die Fahrer ein solches Sicherheitsrisiko eingehen. Die Fahrten fanden ohne Eile in eher entspannter Atmosphäre statt. Die Anwesenheit des Versuchsbegleiters und die Tatsache, dass es sich um eine Versuchsfahrt unter Beobachtung handelte, dürften eher ein gemäßigteres Verhalten bewirken, als unüblich kurze Abstände zu provozieren. Außerdem bleibt zu klären, warum die gemessenen Zeitlücken über einen so großen Bereich streuen. Ein Fahrereinfluss konnte diesbezüglich ausgeschlossen werden, da die individuellen Werte der einzelnen Fahrer in einem ähnlich großen Bereich streuten wie in der Gesamtbetrachtung aller Fahrer.

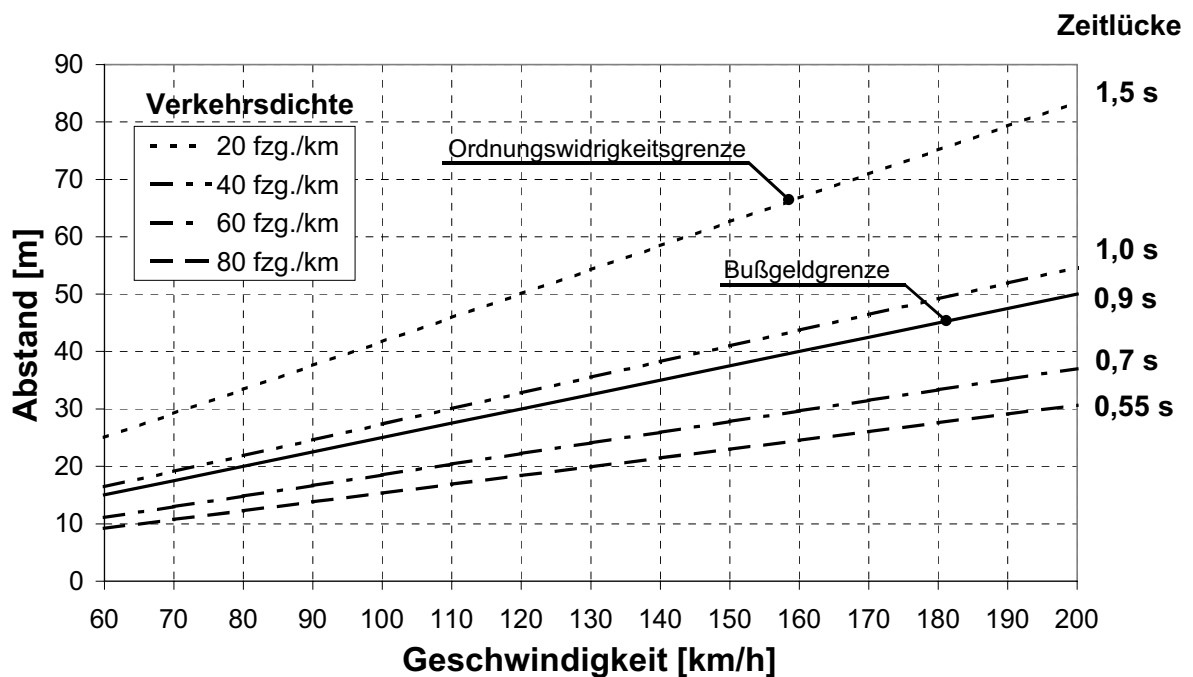
Das führte zu der Vermutung, dass eventuell ein weiterer situativer Einfluss in den Verkehrsteilnehmern auf der Nebenspur zu suchen sei. Zu diesem Zweck wurde aus den Abstandsdaten der vorausfahrenden Fahrzeuge eine Größe generiert, die der Verkehrsdichte in Fahrzeugen pro Kilometer entspricht (**Bild 4.5**).



**Bild 4.5:** Prinzip zur Berechnung der aus Fahrersicht empfundenen Verkehrsdichte

Die Summe aller Fahrzeuge im Bereich bis zum ersten in der eigenen Spur fahrenden Fahrzeug einschließlich wurde auf den Abstand zu diesem Fahrzeug bezogen, so dass die ermittelte Größe einer aus Fahrersicht empfundenen Verkehrsdichte gleichkommt. Die errechneten Werte beziehen sich immer auf die Summe beider Fahrspuren, wobei überholte Fahrzeuge zwangsläufig zu un stetigen Sprüngen in den Werten führen. Auf eine gleitende Mittelung wurde verzichtet, zumal dem Fahrer eine solche Verhaltensweise derzeit auch nur hypothetisch unterstellt werden kann.

Zunächst zeigt sich für den Durchschnitt aller untersuchten Fahrer, dass sich das Abstandsverhalten über der Geschwindigkeit linear verhält (**Bild 4.6**).



**Bild 4.6:** Abstände und Zeitlücken der Fahrer bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten ( $R^2=0,68$ ;  $\sigma=10,4\text{m}$  bzw.  $\sigma=0,31\text{s}$ )

Die Zeitlücke bestätigt sich als geeignete Form der Beschreibung, da die Regressionsgeraden auch bei erweiterten Schätzfunktionen nahezu aus dem Ursprung verlaufen. Demnach kann die Abhängigkeit des Abstandes bei Folgefahrt auf die einfachere Form ohne Achsenabschnitt zurückgeführt werden und ergibt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,68 und einer Standardabweichung von 10,4 Metern bzw. 0,31 Sekunden zu:

$$d_{\text{folg}} = 7 \cdot 10^{-5} \cdot v \cdot \rho^2 - 0,0114 \cdot v \cdot \rho + 0,6172 \cdot v \quad (8)$$

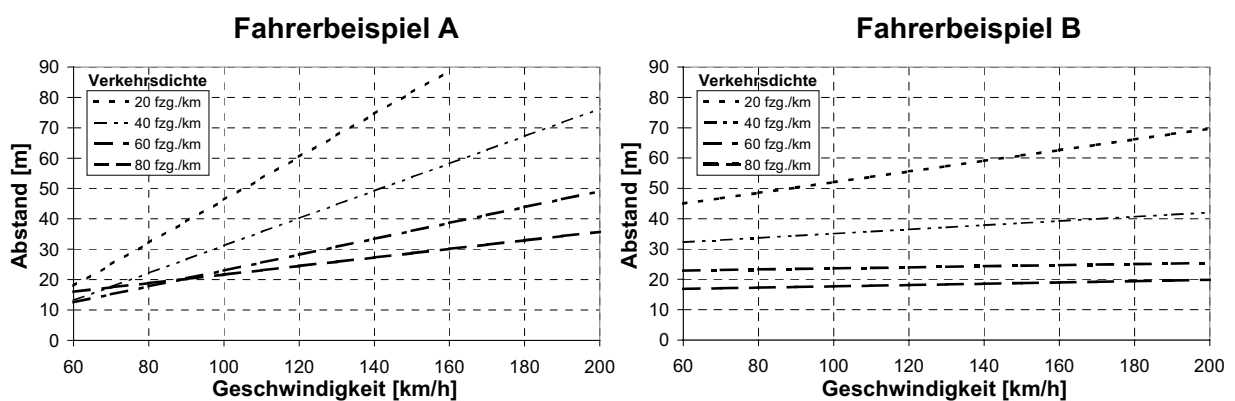
Wollte man die Streuung der Abstände dagegen allein mit der Geschwindigkeit erklären, ergäbe sich lediglich ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,13$ . Das verdeutlicht den signifikanten Einfluss der Verkehrsdichte. Die Korrelation zwischen dem Folgeabstand und den einzelnen Termen in Gleichung 8 ist jeweils signifikant auf dem 1%-Niveau.

Je mehr Fahrzeuge sich im Bereich bis zu dem in der eigenen Fahrspur vorausfahrenden Fahrzeug aufhalten, um so kleiner wird die mittlere eingestellte Zeitlücke. Sie beträgt 1,5 Sekunden bei 20 Fahrzeugen pro Kilometer und entspricht damit dem vorgeschriebenen Sicherheitsabstand. Bei größeren Fahrzeugdichten reduziert sich die Zeitlücke, um bei mehr als 45 Fahrzeugen pro Kilometer unter das mit Bußgeldern geahndete Minimum von 0,9 Sekunden zu sinken. Mit Zunahme der Verkehrsdichte nimmt ihre Einflussstärke ab. Ab 80 Fahrzeugen pro Kilometer erreicht die Zeitlücke einen Grenzwert von 0,55 Sekunden.

Unterschiede zwischen den Fahrern sind soweit ausgeklammert, zeigen jedoch wie erwartet einen stark individuell geprägten Einfluss. Im Gegensatz zum Durchschnitt aller Fahrer beginnen die Regressionsgeraden für die Einzelfälle nicht im Ursprung. Abweichend von Gleichung 8 lässt sich das individuelle Abstandsverhalten in der erweiterten Form

$$d_{\text{folg}} = P_1 \cdot v \cdot \rho^2 + P_2 \cdot v \cdot \rho + P_3 \cdot v + P_4 \cdot \rho + P_5 \quad (9)$$

beschreiben. **Bild 4.7** bzw. **Tabelle 4.1** verdeutlichen anhand zweier bewusst ausgewählter Beispiele, wie unterschiedlich sich einzelne Fahrer verhalten können. Während die Steigung der Geraden im Beispiel A einen starken Einfluss der Geschwindigkeit nachweist, verhält sich Fahrer B insbesondere bei höheren Verkehrsdichten nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit. Dagegen ist der Einfluss der Verkehrsdichte bei beiden Fahrern offensichtlich erkennbar, erstreckt sich im Fall B jedoch auch auf den niedrigen Geschwindigkeitsbereich. Die Unterschiede zwischen den Fahrern sollen hier nicht weiter thematisiert werden, sondern lediglich eine Perspektive aufzeigen, welche Möglichkeiten sich noch aus der Berücksichtigung menschlicher Eigenschaften für die Beschreibung und Erklärung des Folgeverhaltens auf Autobahnen ergeben.



**Bild 4.7:** Abstände am Beispiel zweier Fahrer bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten

**Tabelle 4.1:** Regressionsparameter für zwei Beispiele einzelner Fahrer (alle Parameter signifikant auf dem 1%-Niveau)

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$R^2$	$\sigma$
<b>Fahrer A</b>	0,00009	-0,0181	1,0353	0,535	-35,3	0,61	12,8m / 0,38s
<b>Fahrer B</b>	0,00007	-0,0095	0,3383	-0,314	40,7	0,48	12,7m / 0,38s

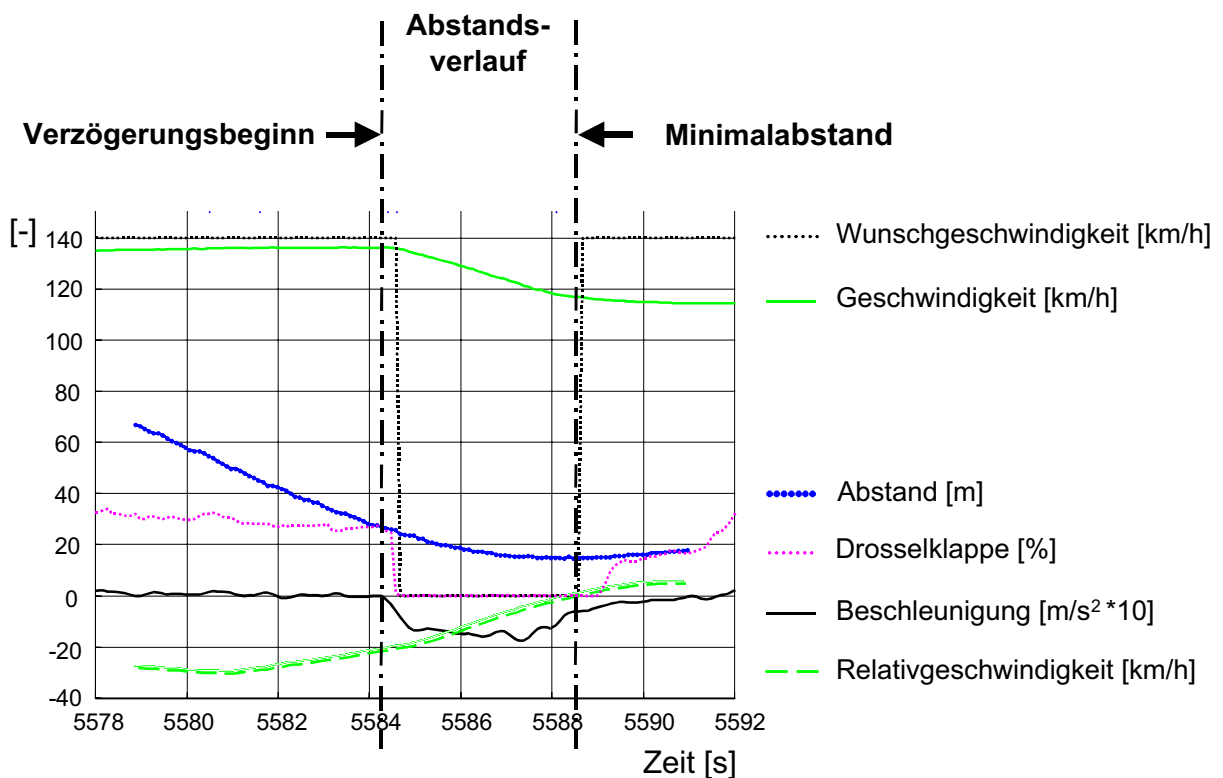
#### 4.2.2 Einscheren

Die Anfangsphase einer Einschersituation ist dadurch gekennzeichnet, dass ein fremdes Fahrzeug die Spur wechselt und in den eigenen Fahrstreifen einfährt. Im Falle von langsameren Fahrzeugen, die hier ausschließlich betrachtet werden sollen, führt dies zu einer Reaktion des Fahrers. Schließt man in der weiteren Betrachtung die Alternative des eigenen Spurwechsels zum Überholen aus, muss der Fahrer seine eigene Geschwindigkeit auf die Geschwindigkeit des Einscherenden drosseln. Damit soll die Situation im Normalfall als abgeschlossen gelten. Kommt es vorher noch zum Ausscheren, einem weiteren Einscheren oder einem eigenen Spurwechsel, so sind diese Fälle zu trennen. Die Anpassung von Abstand und Geschwindigkeit an den eingesicherten Vordermann gilt es zu modellieren.

Der zeitliche Ablauf der Einschersituation erfordert zunächst die Definition von Reaktionsbeginn und –ende. Unter normalen Umständen, d.h. im eingeschwungenen Zustand, ist vor dem eigentlichen Einschervorgang eine konstante Geschwindigkeit eingestellt, die entweder frei gewählt werden kann oder von einem zu diesem Zeitpunkt bereits vorausfahrenden Fahrzeug bestimmt wird. In beiden Fällen liegt üblicherweise keine nennenswerte Beschleunigung oder Verzögerung vor. Ein langsames Fahrzeug löst mit seinem Einscheren unter den getroffenen Voraussetzungen jedoch zwangsläufig eine Verzögerung aus, deren Beginn sich eindeutig am negativen Beschleunigungsverlauf bestimmen lässt (**Bild 4.8**).

Das Ziel der beginnenden Verzögerung ist es, die eigene Geschwindigkeit der des Vorausfahrenden anzupassen. Folglich bietet sich zur Definition des Reaktionsendes der Zeitpunkt an, zu dem die Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Fahrzeugen zu Null wird. Da sich die Fahrer danach meist wieder etwas zurückfallen lassen, mindestens jedoch den dann herrschenden Abstand beibehalten, liegt in diesem Moment der kleinste Abstand vor, künftig kurz mit „Minimalabstand“ bezeichnet.

Damit sind die zeitlichen Grenzen festgelegt, in denen die Einregelung des Abstandes erfolgt und dessen Verlauf von Bedeutung ist, um eine geschlossene Darstellung des Verhaltens bei Einschervorgängen zu erhalten. Die Modellierung erfolgt getrennt nach den drei Blöcken Verzögerungsbeginn, Minimalabstand und Abstandsverlauf auf der Basis von 358 Einschersituationen. Bild 4.8 fasst das strukturierte Verhalten für Einschersituationen in einem exemplarischen Beispiel zusammen.



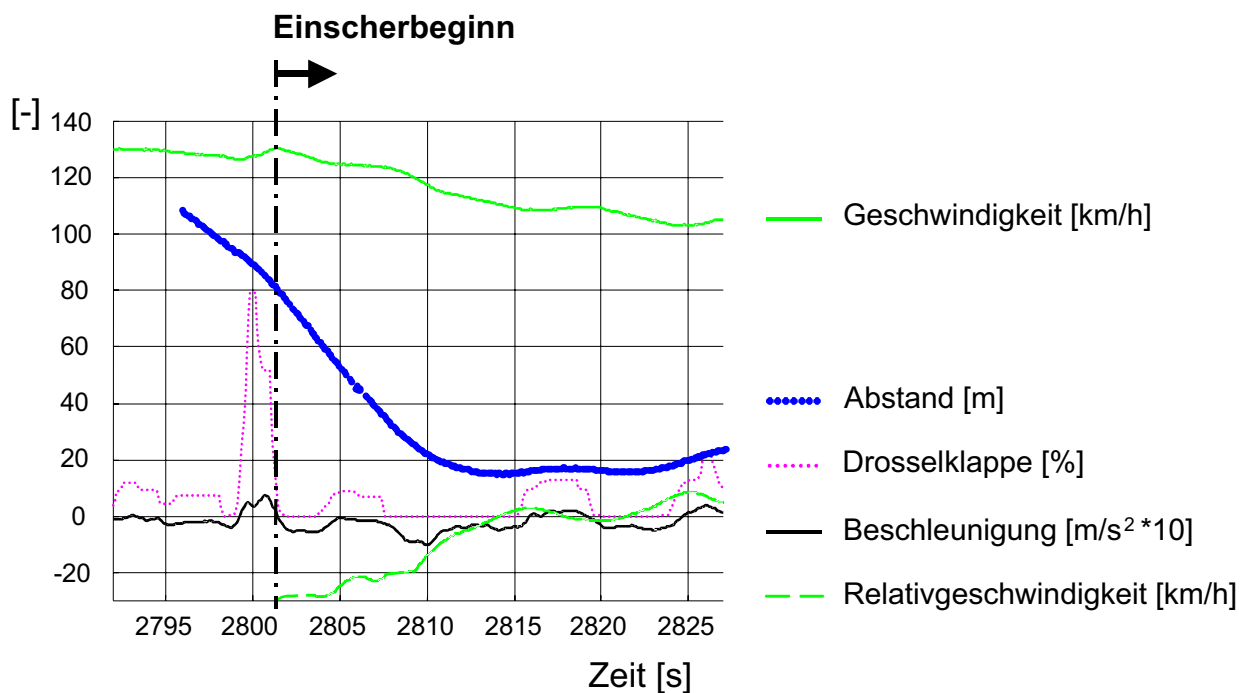
**Bild 4.8:** Strukturierung des Verhaltens in Einschersituationen anhand eines Einzuvorganges

#### 4.2.2.1 Verzögerungsbeginn

Bei der Ermittlung des Verzögerungsbeginns muss sichergestellt sein, dass er tatsächlich auf den Tatbestand des Einscherens zurückzuführen ist. Andernfalls würde man sich Störeinflüsse einhandeln, deren Streuungen sich später kaum mehr erklären lassen. Alternative Reaktionen anstelle der Verzögerung wie beispielsweise ein eigener Spurwechsel bleiben unberücksichtigt, was jedoch nicht ausschließt, dass der Fahrer zunächst mit der Möglichkeit gespielt haben könnte. In diesem Fall würde er sich vielleicht anders verhalten haben, als wenn eine solche Alternative von vornherein gar nicht existiert hätte.

Motive für einen eigenen Spurwechsel zum Überholen können nahezu ausgeschlossen werden, da 90 Prozent der Streckenanteile zweispurig sind und nur Einschervorgänge von rechts betrachtet werden. Dagegen muss beachtet werden, dass der Fahrer antizipieren und drängeln kann. Er verzögert nicht wie erwartet, sondern beschleunigt sogar mitunter zunächst. Dazu ist in **Bild 4.9** ein Situationsbeispiel dargestellt, in dem der vor Einscherbeginn gesetzte Blinker den Fahrer zum Öffnen der Drosselklappe veranlasst. Dieses Verhalten kann in der Absicht erfolgen, das Einscheren zu verhindern, den Einscherenden wieder zum Ausscheren zu bewegen oder bei vermeintlicher Vorhersehbarkeit von dessen Ausscheren die eigene Geschwindigkeit zu erhöhen. Soweit sich solche Motive wie im vorliegenden Fall anhand von Messdaten und Videoaufzeichnung eindeutig identifizieren lassen, werden diese Situationen herausgefiltert.

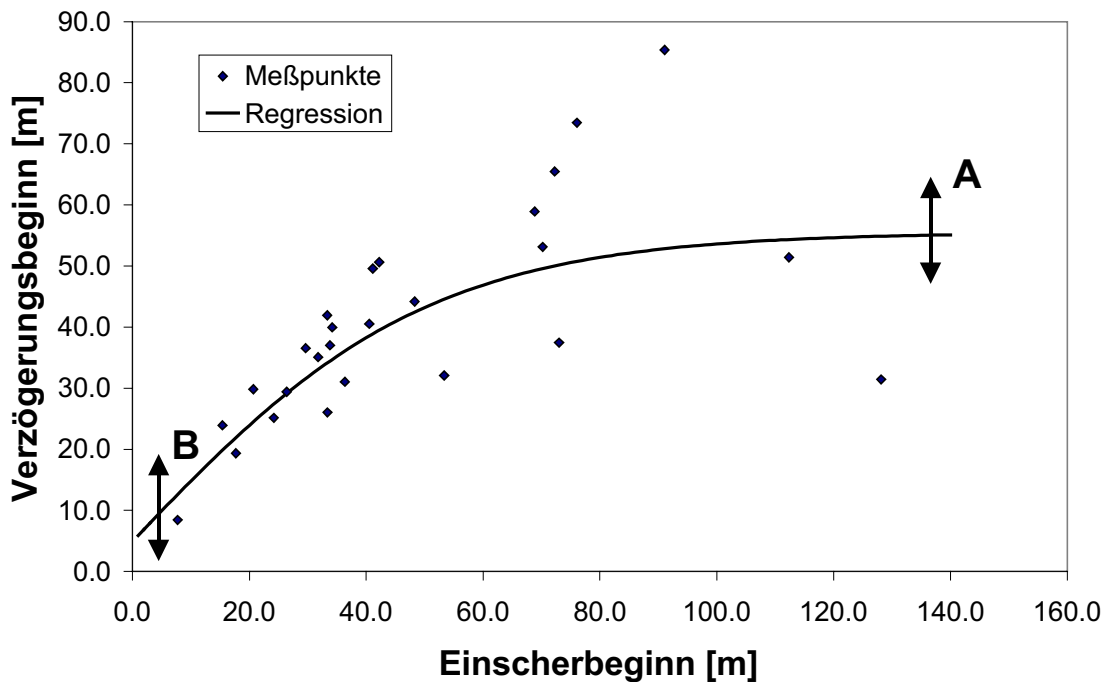




**Bild 4.9:** Situationsbeispiel mit Beschleunigen infolge eines vor Einscherbeginn blinkenden Fahrzeugs

Der Einscherbeginn stellt die zentrale Größe dar, die den Beginn der Verzögerung auslöst. Es ist ein geeigneter Zeitpunkt zu definieren, wobei man den unterschiedlichen Auffassungen und Wahrnehmungen der Fahrer ohnehin nicht gerecht werden kann. Daher wird Wert darauf gelegt, den Einscherbeginn möglichst objektiv und reproduzierbar bestimmen zu können. Als Zeitpunkt wird definiert, dass der erste Hinterreifen des einscherenden Fahrzeugs die Fahrstreifenbegrenzungslinie überfährt. Aus der Sicht des Fahrers dürfte der Abstand das maßgebliche Kriterium zur Beurteilung von Einscherbeginn und Verzögerungsbeginn sein. Da der Abstand im Verlauf einer Einschersituation ausgehend von einer negativen Relativgeschwindigkeit kontinuierlich bis zum minimalen Abstand abfällt, ist eine eindeutige Beschreibung dieser Zeitpunkte durch die entsprechenden Abstandswerte möglich.

**Bild 4.10** zeigt einige Messungen des Verzögerungsbeginns bei unterschiedlichen Einscherabständen. Geschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit bei Einscherbeginn sind in dem ausgewählten Beispiel zunächst in einer relativ engen Bandbreite gehalten und näherungsweise als konstant zu betrachten. Die eingezeichnete Kurve soll nur die Abhängigkeiten veranschaulichen, ohne die zugrunde liegende Regressionsrechnung näher zu bewerten. Dem prinzipiellen Kurvenverlauf liegt zugrunde, dass bei kleinen Einscherabständen sofort verzögert wird. Daher weist die Kurve im unteren Bereich die Steigung eins auf. Der Verlauf beginnt nicht zwangsläufig im Ursprung, da die Definition des Einscherbeginns sicher nicht mit der Auffassung der Fahrer im Einklang stehen kann.



**Bild 4.10:** Modellansatz für den Verzögerungsbeginn der Fahrer infolge Einscherens am Beispiel näherungsweise konstanter Geschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit

Mit zunehmendem Einscherabstand bei ansonsten vergleichbaren Geschwindigkeitsverhältnissen kann die Situation als weniger kritisch bezeichnet werden. Der Spielraum des Fahrers hinsichtlich der zeitlichen Notwendigkeit eines Eingreifens nimmt zu. Dies schlägt sich in einer größeren Streuung der Messpunkte nieder. Grundsätzlich ist bei großen Einscherabständen jedoch zu erwarten, dass der Verzögerungsbeginn asymptotisch gegen einen festen Abstandswert läuft. Der Einscherbeginn spielt keine Rolle mehr, sondern lediglich die Tatsache, dass man sich einem langsameren Fahrzeug auf der eigenen Spur nähert. Der Zwang auf den Fahrer ist hier am niedrigsten ausgeprägt, so dass die individuellen Verhaltensunterschiede am deutlichsten auftreten.

Vermutungen, der Verzögerungsbeginn könne von dem Verkehrszustand vor dem Einscheren (freie/gebundene Fahrt) oder auch von der Art des einscherenden Fahrzeugs (Pkw/Lkw) abhängen, haben sich nicht bestätigt.

Mathematisch lässt sich der Zusammenhang zwischen Verzögerungsbeginn und Einscherbeginn mit dem Tangens-Hyperbolicus ausdrücken:

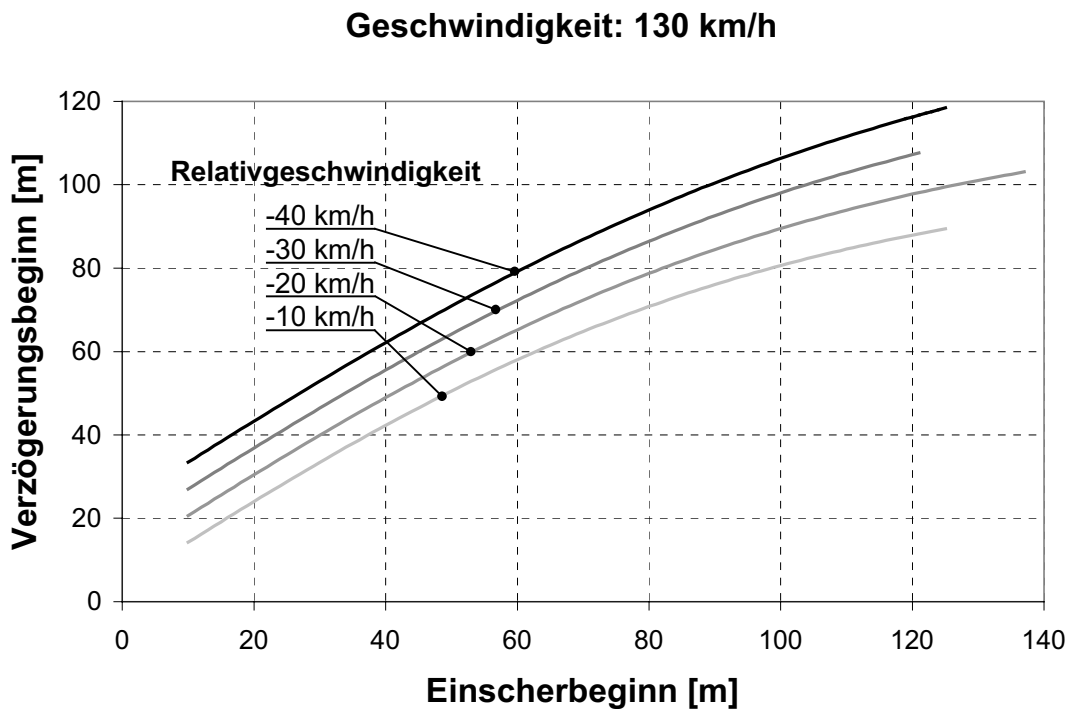
$$d_0 = (A - B) \cdot \frac{e^{\frac{2d_{ein}}{A-B}} - 1}{e^{\frac{2d_{ein}}{A-B}} + 1} + B \quad (10)$$

Die freien Parameter A und B stellen wie in Bild 4.10 angedeutet Freiheitsgrade zur Anpassung der Berechnungsfunktion an die Messungen dar. Sie berücksichtigen den Einfluss der bisher als konstant angenommenen Geschwindigkeit und Relativgeschwindigkeit. Ihre Funktionen wurden anhand einer Regressionsrechnung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,83 und einer Standardabweichung von 12,5 Metern bestimmt:

$$A = 0,009 \cdot \Delta v_0 \cdot v_0 + 1,9 \cdot v_0 - 2,6 \cdot \Delta v_0 - 156,4 \quad (11)$$

$$B = -0,09 \cdot v_0 - 0,64 \cdot \Delta v_0 + 9,6 \quad (12)$$

Eine anschauliche Darstellung der Abhängigkeit des Verzögerungsbeginns von der Relativgeschwindigkeit liefert **Bild 4.11**. Auf die Darstellung der Messpunkte sei verzichtet, da streng genommen kaum Messungen existieren, die diese Kurven exakt repräsentieren würden. Hier stoßen grafische Möglichkeiten zur Beurteilung mehrdimensionaler Abhängigkeiten an ihre Grenzen. Diesbezüglich sei auf Kap. 5.2.1 verwiesen.



**Bild 4.11:** Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Verzögerungsbeginn der Fahrer infolge Einscherens für eine Geschwindigkeit von 130 km/h ( $R^2=0,83$ ,  $\sigma=12,5\text{m}$ )

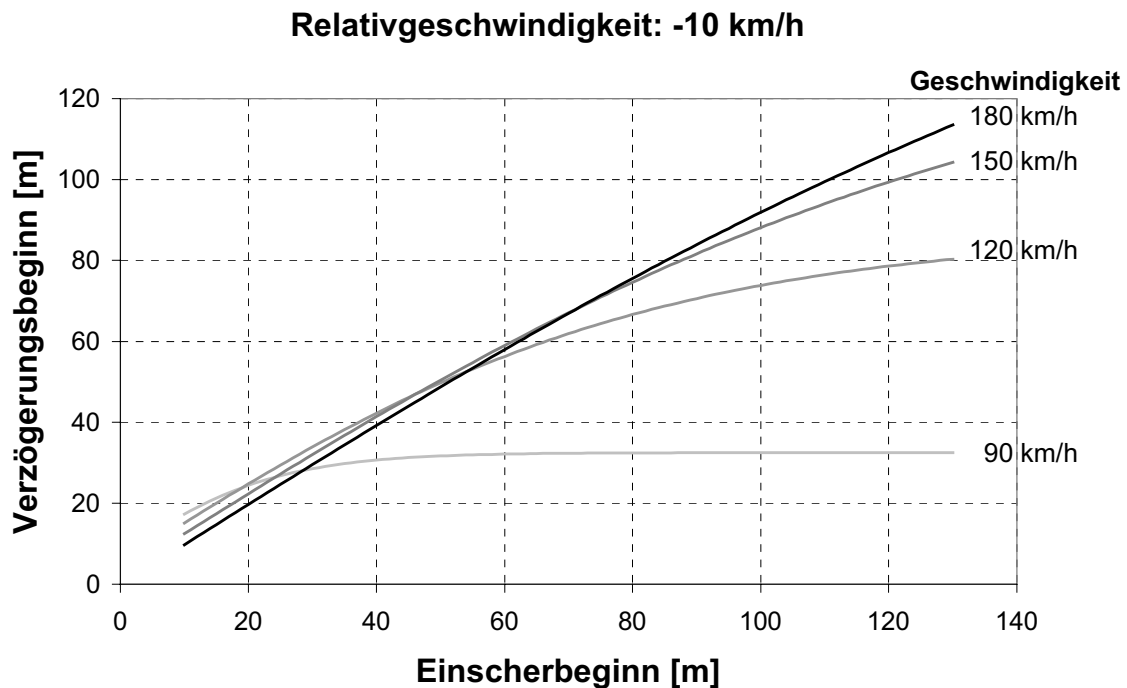
Für kleine Relativgeschwindigkeiten beginnt der modellierte Verlauf des Verzögerungsbeginns nahezu im Ursprung. Der Definition des Einscherbeginns zufolge beginnt der Fahrer mit seiner Verzögerung in dem Moment, wenn das einscherende Fahrzeug soeben in seine Fahrspur einfährt. Mit steigender Relativgeschwindigkeit verschieben sich die modellierten Verläufe zu größeren Abständen, d.h. der Verzögerungsbeginn erfolgt zunehmend früher. Hierbei handelt

es sich um einen Gewinn an Sicherheit, da zum Abbau der höheren Relativgeschwindigkeiten auch größere Abstände zur Verfügung stehen. Gleichzeitig muss daraus gefolgert werden, dass der Fahrer abweichend vom definierten Einscherbeginn tatsächlich auch auf andere Kriterien reagiert. Er zeigt offensichtlich die Fähigkeit, bevorstehende Einschervorgänge antizipieren zu können.

Es liegt nahe, die Erklärung für die Antizipation im Blinkersignal des Einscherenden zu suchen. Nähere Untersuchungen hierzu ließen jedoch ein indifferentes Verhalten der Fahrer beobachten. In manchen Fällen bewirkte der Blinker des Einscherenden ein früheres Verzögern, in anderen Fällen folgte jedoch häufig zunächst ein Beschleunigen. Die Tatsache, dass der Einschervorgang nur angezeigt, jedoch nicht unbedingt auch schon durchgeführt wird, bietet dem Fahrer Spielraum. So versuchen manche Fahrer mitunter, das Einscheren zu verhindern, solange die eigene Spur noch nicht blockiert wird. Im Gegensatz zum Einscherbeginn in der definierten Form erweist sich das Blinkersetzen nicht als signifikanter Auslöser für den Verzögerungsbeginn, solange intra- und interindividuelle Unterschiede der Fahrer dabei nicht berücksichtigt werden.

Die Antizipation des Fahrers erklärt sich unter anderem schon aus der Definition des Einscherbeginns, die zunächst unter der Maßgabe erfolgte, dass der Zeitpunkt objektiv und reproduzierbar bestimmt werden muss. Doch bereits kleine Änderungen der Position des Einscherenden in seiner eigenen Fahrspur können dem beobachtenden Fahrer den Hinweis liefern, dass ein Einschervorgang bevorsteht. Die Wahrscheinlichkeit erhöht sich zusätzlich, wenn das fremde Fahrzeug beispielsweise auf ein ihm vorausfahrendes Fahrzeug aufläuft. So bestimmt sich die Wahrscheinlichkeit für ein Einscheren aus dem Situationskontext anhand verschiedener Einflüsse, die in Summe eine subjektive Einschätzung des Fahrers ergeben und ihn ab einem gewissen Grad zum Verzögern veranlassen. Es ist nicht unbedingt zu erwarten, dass sich ein Einscheren bei höheren Relativgeschwindigkeiten früher andeutet. Vielmehr dürfte aufgrund der empfundenen und gewünschten Sicherheit die Reaktionsschwelle des Fahrers niedriger liegen, so dass er entsprechend früher mit der Verzögerung beginnt.

Dass der Antizipation Grenzen gesetzt sind, ist leicht nachvollziehbar und schlägt sich auch in den Verläufen von Bild 4.11 nieder. Im asymptotischen Verhalten zeigen sich nicht nur unterschiedliche maximale Verzögerungsabstände, sondern die Kurven laufen mit zunehmendem Einscherbeginn leicht auseinander. Der Einfluss der Relativgeschwindigkeit prägt sich bei größeren Einscherabständen deutlicher aus, woraus man ableiten könnte, dass die Fahrer vergleichsweise früher reagieren möchten. Bei großen Einscherabständen bietet sich ihnen die Möglichkeit dazu, da mehr Handlungsspielraum zur Verfügung steht und freiwillig ohnehin erst nach dem Einscheren verzögert wird. Bei knappen Einschervorgängen dagegen werden sie plötzlich mit Gegebenheiten konfrontiert, die ein schnelles Handeln erfordern, dem durch die eingeschränkte Andeutung des Einscherens natürliche Grenzen gesetzt sind. Maßgeblicher Einfluss auf den maximalen Verzögerungsabstand ist jedoch die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Verzögerungsbeginns, worauf **Bild 4.12** näher eingeht.

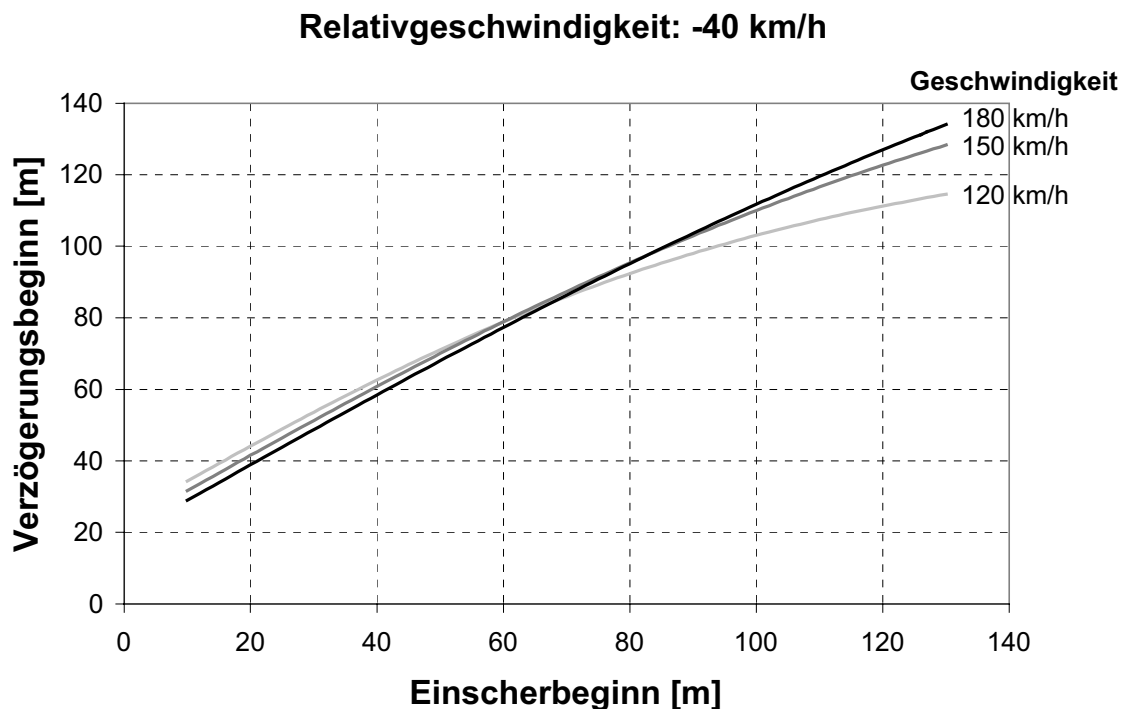


**Bild 4.12:** Einfluss der Geschwindigkeit auf den Verzögerungsbeginn der Fahrer infolge Einscherens für eine Relativgeschwindigkeit von  $-10 \text{ km/h}$  ( $R^2=0,83$ ,  $\sigma=12,5\text{m}$ )

Im Gegensatz zu kleinen Einscherabständen, bei denen die Geschwindigkeit praktisch keinen Einfluss hat, zeigen sich mit zunehmenden Einscherabständen im asymptotischen Verhalten doch gravierende Unterschiede. Je kleiner die Geschwindigkeit ist, desto früher fallen die modellierten Verläufe ab und münden in entsprechend kleineren Grenzwerten, den maximalen Verzögerungsabständen. Am deutlichsten treten diese Verhältnisse bei kleinen Relativgeschwindigkeiten auf.

Hierbei handelt es sich um einen Effekt, der sich aus den physikalischen Zusammenhängen so nicht zwangsläufig ergeben muss. Der Abstand, der zum Abbau der Relativgeschwindigkeit benötigt wird, hängt lediglich von der Relativgeschwindigkeit selbst ab und ist bei vergleichbarer Verzögerung unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit. Daher müssen die Eigenschaften des Fahrers selbst, im Speziellen seine Wahrnehmung, für dieses Verhalten verantwortlich sein. Nach [99] hängen die zeitlichen Schwellen zur Wahrnehmung der Relativgeschwindigkeit von deren Betrag und der Entfernung zu dem Objekt ab. Der Zeitbedarf nimmt mit größerem Abstand und kleinerer Relativgeschwindigkeit stark zu. Diese Erkenntnisse spiegeln sich auch im Verhalten der Fahrer in Bild 4.12 wider. Insbesondere kleine Relativgeschwindigkeiten werden in Verbindung mit großen Einscherabständen erst so spät erkannt, dass der Fahrer sich in der Einschätzung seiner Sicherheitsreserve primär an seiner eigenen Geschwindigkeit orientiert. Je schneller er fährt, desto früher und bei entsprechend größeren Abständen verzögert er, auch wenn dies objektiv betrachtet nicht

notwendig wäre. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit nimmt der Einfluss der Geschwindigkeit erwartungsgemäß ab, wie **Bild 4.13** erkennen lässt.



**Bild 4.13:** Einfluss der Geschwindigkeit auf den Verzögerungsbeginn der Fahrer infolge Einscherens für eine Relativgeschwindigkeit von -40 km/h ( $R^2=0,83$ ,  $\sigma=12,5\text{m}$ )

#### 4.2.2.2 Minimalabstand

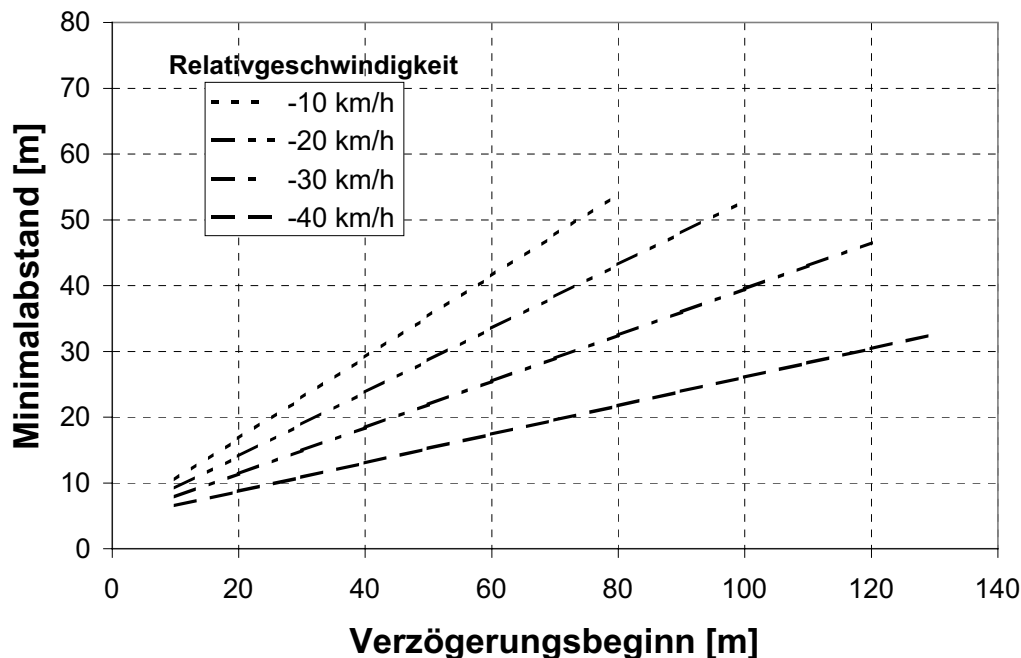
Auch bei der Wahl der Minimalabstände gibt es unterschiedliche Motive, die den Fahrer zu einem beobachtbaren Verhalten veranlassen können. Der Abstand kann in der Überzeugung eingestellt werden, dem Eingesicherten länger folgen zu müssen. Er wird aber auch in der Erwartung verkürzt, dass rechtzeitig wieder ausgesichert wird oder selbst die Spur gewechselt werden kann, um einen größeren Geschwindigkeitsverlust zu vermeiden. Schließlich bleibt noch das Drängeln zu erwähnen, das den Vorfahrenden zum Ausscheren bewegen soll.

Die Einordnung der Minimalabstände ist mit der Schwierigkeit verbunden, diese unterschiedlichen Situationen erkennen zu können. Abgesehen davon, dass ein technisches System wie das ACC nicht das Motiv zum Drängeln abbilden soll, besitzt es derzeit auch nicht das Situationsbewusstsein, ein Ausscheren vorhersehen zu können. Um objektiv vorzugehen, wurden nur die eindeutigen Situationen aussortiert, in denen die Drosselklappe beispielsweise nochmal deutlich geöffnet und wieder geschlossen wurde. Trotzdem bleibt festzustellen, dass auf diese Weise ein eher geringer Anteil der zu trennenden Situationen identifiziert werden konnte und nach wie vor verschiedene Motive den eingehaltenen Abständen zugrunde liegen können.

Zur Modellierung des Minimalabstandes ergeben sich Abhängigkeiten vom Abstand und der Relativgeschwindigkeit bei Verzögerungsbeginn (Gleichung 13). Die einzelnen Erklärungsbeiträge sind alle signifikant auf dem 1%-Niveau, während die Geschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss zeigt. Die mathematische Formulierung der Zusammenhänge ergibt sich aus einer linearen Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,56 und einer Standardabweichung von 11,4 Metern. In Kap. 5.2.1 wird die Güte dieser Ergebnisse näher diskutiert.

$$d_{\min} = 0,0134 \cdot \Delta v_0 \cdot d_0 + 0,753 \cdot d_0 + 4,4 \quad (13)$$

**Bild 4.14** demonstriert die Zusammenhänge. Grundsätzlich nimmt der Minimalabstand linear über dem Abstand bei Verzögerungsbeginn zu. Je später der Fahrer zu verzögern beginnt, desto näher lässt er sich auf den Eingescherten auflaufen. Der Fahrer toleriert offensichtlich kleinere Abstände, obwohl er in keinem Fall die maximal mögliche Verzögerung auch nur annähernd ausschöpft. Demzufolge verzichtet er zugunsten einer komfortableren Verzögerung auf sicherere Abstände. Das Gleiche trifft auch auf größere Relativgeschwindigkeiten zu, die ebenfalls zu kleineren Minimalabständen führen. Auch hier wird, obwohl durchaus möglich, nicht nur stärker verzögert, sondern auch ein kleinerer Sicherheitsabstand akzeptiert.



**Bild 4.14:** Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Minimalabstand des Fahrers in Einschersituationen ( $R^2=0,56$ ,  $\sigma=11,4\text{m}$ )

Die Fahrer handeln in dem Zielkonflikt, einerseits ausreichende Abstände einzuhalten und andererseits komfortabel zu verzögern. Die Gewichtung nach den Kriterien Sicherheit und

Komfort hängt erwartungsgemäß davon ab, wie kritisch eine Situation erscheint. Mit einem späteren Verzögerungsbeginn verbleibt weniger Spielraum, so dass die Minderung des Minimalabstandes infolge höherer Relativgeschwindigkeiten geringer ausfällt. Dieser Sachverhalt äußert sich in den flacher verlaufenden Geraden, die sich der Abszisse zwar komfortbedingt annähern, diese jedoch nicht erreichen dürfen. Letzteres würde die Kollision bedeuten, an deren Vermeidung der Fahrer die Notwendigkeit seines Handelns orientiert. Dazu richtet er sich ausschließlich nach den absoluten Abständen. Die Geschwindigkeit findet im Zuge der Einschersituation keine Berücksichtigung, obwohl die minimale Zeitlücke, die sich aus dem Quotient aus Minimalabstand und Geschwindigkeit berechnet, die verfügbare Reaktionszeit im Falle plötzlicher Störungen repräsentiert.

#### **4.2.2.3 Abstandsverlauf**

Nach der Bestimmung von Reaktionsbeginn und Situationsende gilt es, das Fahrerverhalten zwischen diesen beiden charakteristischen Zeitpunkten zu beschreiben. Analog zu Verzögerungsbeginn und Verzögerungsende stellt abermals der Abstand die maßgebliche Größe dar, dessen Verlauf in geeigneter Weise modelliert werden soll. Zuvor muss jedoch auch hier geklärt werden, welche Motive einem bestimmten Verhalten zugrunde gelegen haben können, um nur gewünschte und vergleichbare Verhaltensweisen einzubeziehen.

Als relevantes Kriterium diente auch diesmal der zeitliche Verlauf der Drosselklappe. Ausgehend von einer harmonischen Verzögerung mit dem Ziel, lediglich die Geschwindigkeit des Eingesicherten bei einem gewählten Abstand zu erreichen, mussten Situationen mit anderen Absichten identifiziert werden. Zwischenzeitliches Öffnen der Drosselklappe setzt voraus, dass der Fahrer mit baldiger freier Fahrt gerechnet hat oder gar Drängeln wollte. Diese Situationen wurden von der Modellierung ausgenommen. Damit reduzierten sich die modellierbaren Abstandsverläufe auf 80 Einschersituationen.

Zunächst galt es, eine geeignete Parameterschätzfunktion zu finden. Dazu musste eine Auswahl an Eingangsgrößen getroffen werden, die geeignet zu verknüpfen waren. Da Ausprobieren wenig Aussicht auf Erfolg bot und auch die Streuungen infolge eines stark individuell geprägten Verhaltens die Aufgabe nicht gerade erleichterten, wurde das Hauptaugenmerk zunächst im Rahmen einer Simulation auf die wesentlichen objektiv beschreibbaren Einflussfaktoren gerichtet.

In Einschersituationen, in deren Verlauf keines der Fahrzeuge wieder die Spur wechselt, unterliegt der Fahrer einem Handlungszwang. Es lassen sich Bedingungen formulieren, die einzuhalten sind, um die ansonsten drohende Kollision zu verhindern. So steht nur ein begrenzter Weg zur Verfügung, um die vorgegebene Relativgeschwindigkeit abzubauen. Darüber hinaus liegt es im Interesse des Fahrers, die Verzögerung möglichst angenehm zu gestalten. Diese Forderungen erfüllt ein zeitlich symmetrisch ansteigender und abfallender Verzögerungsverlauf mit stetigen Übergängen, um Ruckfreiheit zu gewährleisten. Die Sichtung einiger Beispiele aus ersten Versuchsfahrten bestätigte die angestellten Überlegungen.



Auf der Grundlage der genannten Bedingungen wurden Einschersituationen simuliert, d.h. in Abhängigkeit von vorgegebenen Randbedingungen wie Geschwindigkeit, Relativgeschwindigkeit, Einscherabstand und Minimalabstand wurden theoretische Verzögerungsverläufe berechnet. Daraus ließen sich die entsprechenden Abstandsverläufe gewinnen, die nicht mehr individuellen Schwankungen unterliegen. Diese Vereinfachung ermöglichte es, die Struktur der Parameterschätzfunktion soweit an die Gegebenheiten anzupassen, dass sich zumindest bei variablen situativen Bedingungen konstante Parameter ergaben. Abschließend wurde die Parameterschätzfunktion an die gemessenen Abstandsverläufe angepasst und die endgültigen Parameter berechnet.

Der modellierte zeitliche Verlauf des Abstandes, den die Fahrer während einer Einschersituation einstellen, ergibt sich zu

$$d_{\text{mod}}(t) = -0,06 \cdot (d_0 - d_{\text{min}}) \cdot \frac{\Delta v(t)^2}{\Delta v_0^2} + 0,37 \cdot \sqrt{d_0 - d_{\text{min}}} \cdot \frac{\Delta v(t)}{\Delta v_0} + \dots$$

$$1,12 \cdot (d_0 - d_{\text{min}}) \cdot e^{\frac{\Delta v_0 \cdot t}{2,16(d_0 - d_{\text{min}}) + 12,6}} + 0,95 \cdot d_{\text{min}} \quad (14)$$

Die dominante zeitliche Eingangsgröße ist die Relativgeschwindigkeit  $\Delta v(t)$ , die einfach und quadratisch eingeht. Damit wird bei der Abstandsbestimmung auch berücksichtigt, dass einscherende Fahrzeuge ihre Geschwindigkeit im Laufe der Situation häufig ändern. Die Zeitvariable  $t$  beginnt mit dem Verzögerungsbeginn von Null an zu laufen. Sie ist auch explizit in Form einer Exponentialfunktion enthalten. Dieser Term ist notwendig, um die qualitative Form des modellierten Abstandsverlaufes an die realen Verläufe anpassen zu können. Gleichzeitig ergibt sich der Nachteil, dass dieser Term im Gegensatz zur Relativgeschwindigkeit von der weiteren Situationsentwicklung entkoppelt ist. Dennoch ist dies tolerierbar, da sein Anteil als Exponentialfunktion relativ schnell gegen Null strebt. Die erzielte Modellgüte rechtfertigt die Vorgehensweise.

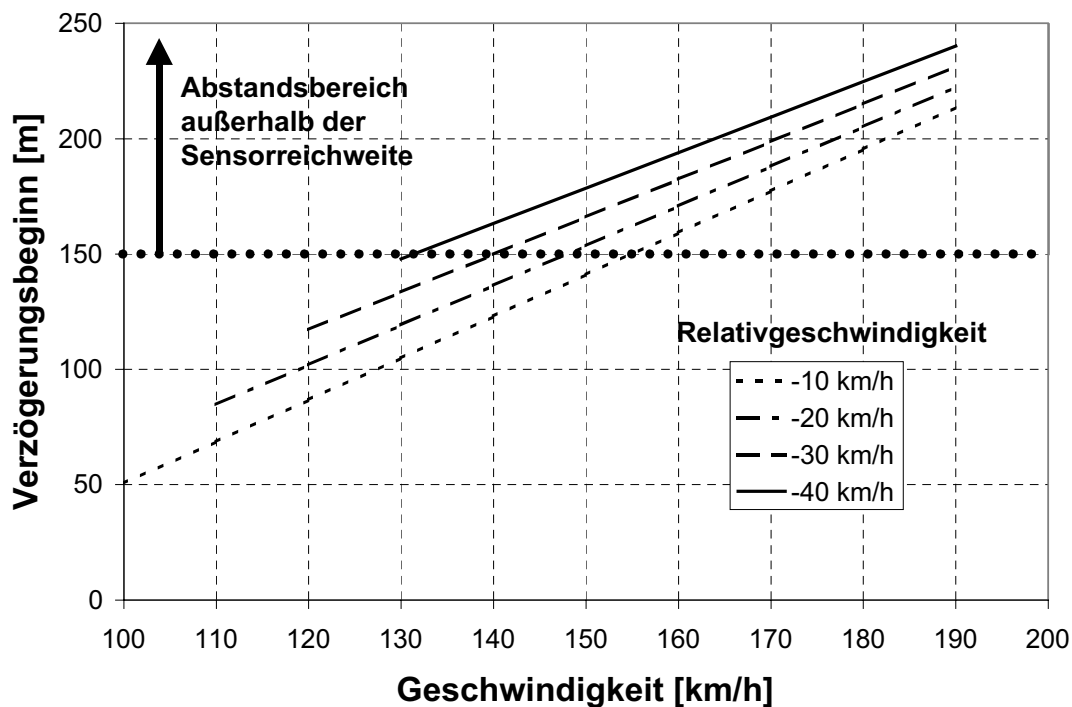
Neben den angesprochenen zeitlichen Eingangsgrößen sind auch einige zeitkonstante Variable enthalten, die für jede Situation spezifisch bestimmt werden. Sie charakterisieren objektive Anfangs- und Endbedingungen wie den Abstand bei Verzögerungsbeginn  $d_0$ , die Relativgeschwindigkeit bei Verzögerungsbeginn  $\Delta v_0$  sowie den Minimalabstand  $d_{\text{min}}$ . Mit Hilfe dieser Variablen kann die gleiche Parameterschätzfunktion für alle Einschersituationen verwendet werden. Die Werte für  $d_0$  und  $d_{\text{min}}$  ergeben sich aus den Gleichungen (10) und (13),  $\Delta v_0$  ist aus der Messung vorgegeben. Dabei fällt auf, dass die Geschwindigkeit keinen direkten Einfluss ausübt. Sie spielt nur implizit eine Rolle, da der Abstand bei Verzögerungsbeginn davon abhängt.

### 4.2.3 Annäherung

Aussagen zum Verzögerungsbeginn bei Annäherungen lassen sich bereits aus den Ergebnissen der Einschersituation ableiten, wenn man unendlich große Einscherabstände ansetzt:

$$d_{0,an} = \lim_{d_{ein} \rightarrow \infty} d_{0,ein} \quad (15)$$

Setzt man für  $d_{0,ein}$  die Gleichung (10) in Verbindung mit den Gleichungen (11) und (12) ein, dann dürfte der Grenzwert des Verzögerungsbeginns für unendlich grosse Einscheraabstände den Verhältnissen bei Annäherungen theoretisch recht nahe kommen (**Bild 4.15**). Problematisch erscheint in diesem Zusammenhang nicht nur die mit dem Einscheraabstand abnehmende Häufigkeit auswertbarer Einschersituationen, sondern auch die damit verbundenen starken Streuungen im Verhalten der Fahrer, da mehr Spielraum zum Reagieren verbleibt. Die mangelnde Schärfe der Rückschlüsse aus den Einschersituationen lässt eine nähere Untersuchung der Annäherungen äußerst wünschenswert erscheinen. Gleichzeitig verdeutlicht die Darstellung der berechneten Grenzwerte in Bild 4.15 jedoch auch, dass die auf 150 Meter begrenzte Reichweite des Radarsensors für die Messung solch großer Abstände, die für den Verzögerungsbeginn bei Annäherungen zu erwarten sind, größtenteils nicht ausreichen dürfte.



**Bild 4.15:** Grenzwerte des Verzögerungsbeginns der Fahrer für unendlich große Einscheraabstände in Relation zum Messbereich des Radarsensors

Die Analyse der Annäherungen bestätigte diesen Sachverhalt. Abgesehen davon, dass in 70 Prozent der Fälle bereits verzögert wurde, als der Vorfahrer im Messbereich des Radars erfasst wurde, wiesen die Fahrer in den verbleibenden Situationen keine eindeutige Reaktion auf, an der sich ein objektiver Verzögerungsbeginn festmachen ließ. Da es sich in diesen Fällen meistens um niedrige Relativgeschwindigkeiten handelte und die Situationen vergleichsweise früh zu erkennen waren, verblieb den Fahrern genug Spielraum, die Verzögerung zu verschleppen. Häufig wurde mit dem Gaspedal „gespielt“ und abwechselnd verzögert und

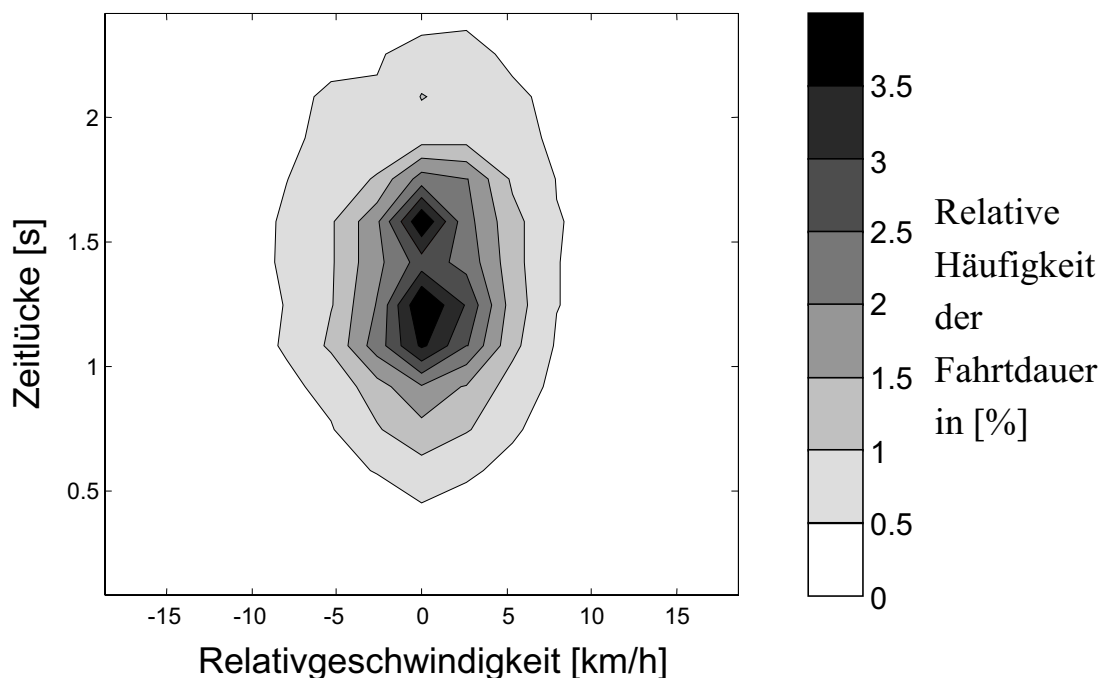
wieder leicht beschleunigt. Dadurch wird eine Auswertung des Verzögerungsbeginns leider unmöglich.

Die Minimalabstände weisen auch bei der Annäherung keine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit auf. Hier dürfte der Verzögerungsbeginn eine ähnliche Rolle spielen wie beim Einscheren, doch auch dieser Zusammenhang kann ohne die Abstandswerte für den Verzögerungsbeginn nicht überprüft werden.

### 4.3 ACC-Verhalten

#### 4.3.1 Folgefahrt

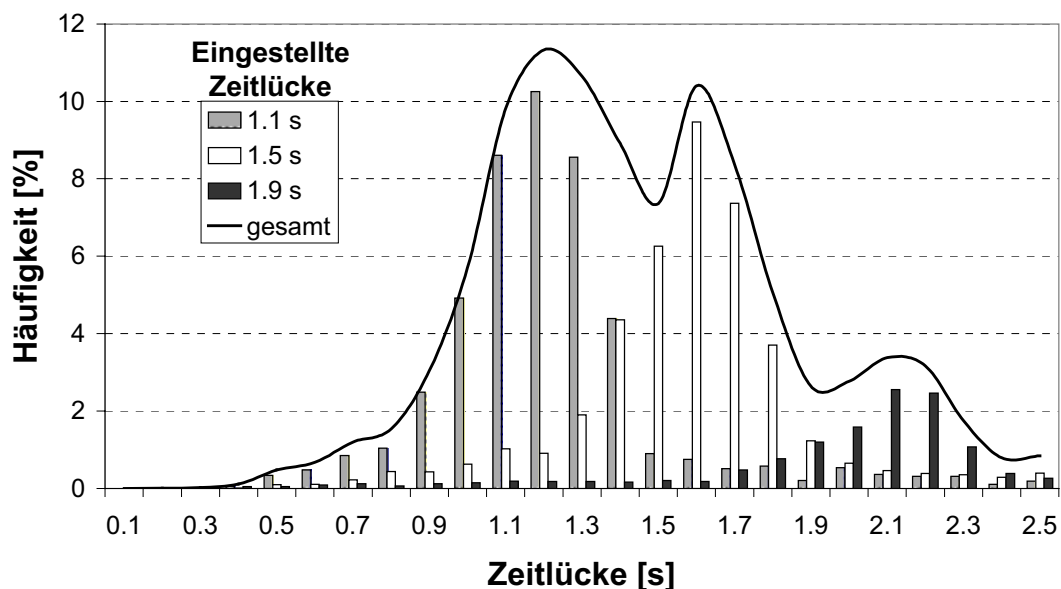
Das ACC stellt den Folgeabstand ausschließlich in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ein. Dazu bietet sich dem Fahrer die Möglichkeit, die Zeitlücke in drei Stufen von 1.1, 1.5 und 1.9 Sekunden vorzuwählen. Entsprechende Häufungen ergeben sich in diesen Bereichen bei der Darstellung der Zeitlücken für alle Fahrten und Situationen, wobei der größte Wunschabstand vergleichsweise selten genutzt wurde (**Bild 4.16**). Die Relativgeschwindigkeiten schwanken bei ACC nur zwischen  $\pm 8$  Kilometern pro Stunde und weisen im Vergleich zu den Fahrern (**Bild 4.3**, S. 50) auf gleichmäßigere Geschwindigkeitsverhältnisse hin.



**Bild 4.16:** Relative Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von Zeitlücke und Relativgeschwindigkeit für ACC-Betrieb

Auch für ACC beschränken sich die weiteren Betrachtungen auf Relativgeschwindigkeiten im Bereich von  $\pm 3$  Kilometern pro Stunde, um ausschließlich die für eine längerfristige Folgefahrt typischen Verhältnisse zu untersuchen. **Bild 4.17** zeigt die zeitlichen Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Zeitlücken getrennt nach den eingestellten Wunschabständen, wobei

ausschließlich der reine ACC-Betrieb ohne Übersteuerungen durch den Fahrer berücksichtigt wurde. Die tatsächlich eingeregelter Zeitlücken schwanken verständlicherweise um die eingestellten Sollwerte, da Beschleunigungen und Verzögerungen des vorausfahrenden Fahrzeugs ausgeregelt werden müssen. Auf diese Streuungen soll nicht weiter eingegangen werden, da sie dem Verhalten des Fahrers ohnehin nicht gegenüber gestellt werden können. Die Sollgrößen der Fahrer sind im Gegensatz zum ACC nicht bekannt. Es wäre vorstellbar, den beabsichtigten Abstand durch einfache Mittelung zu bestimmen, wenn der Fahrerwunsch nicht individuellen und äußeren Einflüssen unterliegen würde, wie im Fall der Verkehrsdichte nachgewiesen werden konnte (Kap. 4.2.1). Abgesehen davon würde die Mittelung unterschiedliche Wahrnehmungsschwellen, wie sie nach [105] für abnehmende und zunehmende Abstände bei Folgefahrt differenziert zu beobachten sind, nicht einbeziehen.



**Bild 4.17:** Verteilung der gemessenen Zeitlücken bei Folgefahrt mit ACC für unterschiedlich einstellbare Zeitlücken (Mittelwerte: 1,26 / 1,64 / 2,06)

Normalerweise sollten sich bei Folgefahrt im Mittel jeweils die vorgegebenen Zeitlücken von 1,1, 1,5 und 1,9 Sekunden ergeben. Die leicht erhöhten Mittelwerte von 1,26, 1,64 und 2,06 Sekunden erklären sich aus der unscharfen Trennung zwischen abstandsgeregelten und „zufälligen“ Folgefahrten. Letztere sind dadurch gekennzeichnet, dass die gefahrene Geschwindigkeit bereits der eingestellten Wunschgeschwindigkeit entspricht und die gemessene Zeitlücke über der gewünschten Zeitlücke liegt. Fährt beispielsweise bei einer gewählten Zeitlücke von 1,1 Sekunden ein Fahrzeug mit 1,3 Sekunden und gleicher Geschwindigkeit voraus, dann kann diese Situation als Folgefahrt erfasst sein, obwohl sich das ACC im Modus der Geschwindigkeitsregelung befindet. Damit verzerrt sich der Blick auf die Regelungsgenauigkeit des ACC.

### 4.3.2 Einscheren

Das Verhalten des ACC in Einschersituationen wird analog zum Fahrer nach den gleichen Methoden analysiert. Soweit es Abweichungen in der Vorgehensweise gibt, wird darauf gesondert eingegangen. Für das ACC werden Verzögerungsbeginn und Minimalabstand auf der Basis von 416 Einschersituationen modelliert, um den direkten Vergleich von Fahrer und Assistenzsystem zu ermöglichen.

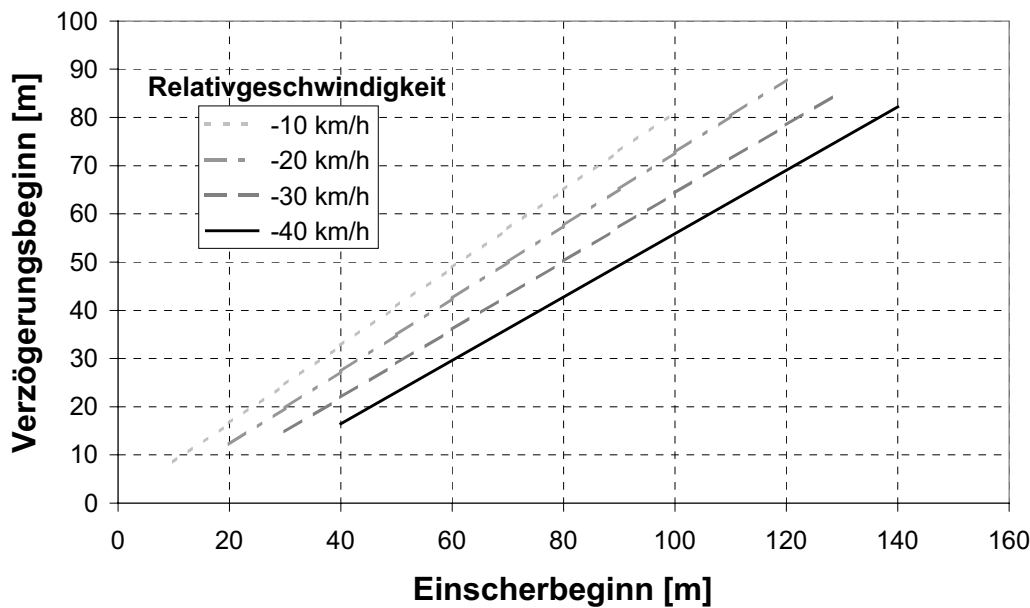
Die Auswahl der auszuwertenden Einschersituationen gestaltet sich einfacher, da sich das ACC im Gegensatz zum Fahrer nicht zu Änderungen im Verhalten motivieren lässt. Es muss lediglich sichergestellt sein, dass das System im Verlauf der Einschersituation auch tatsächlich eingeschaltet blieb und der Fahrer keine Änderungen der Einstellungsparameter vornahm oder gar mit dem Gaspedal übersteuerte. Neben den bereits beim Fahrer untersuchten Einflussgrößen müssen beim ACC auch die wählbaren Einstellungen von Wunschgeschwindigkeit und Folgeabstand einbezogen werden, um deren Auswirkungen auf das Verzögerungsverhalten untersuchen zu können. Da sich diesbezüglich keine Abhängigkeiten ergaben, können die Ergebnisse für Verzögerungsbeginn und Minimalabstand in der gleichen graphischen Form wie beim Fahrer dargestellt werden.

#### 4.3.2.1 Verzögerungsbeginn

Das ACC beginnt mit der Verzögerung in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit und dem Abstand bei Einscherbeginn. Die Erklärungsbeiträge der beiden ersten Summanden in Gleichung 16 liegen auf einem Signifikanzniveau von 1%, während sich der dritte Summand ( $\Delta v_0$ ) als signifikant auf dem 5%-Niveau erweist. Die wählbare Zeitlücke hat dagegen keinen Einfluss, da sich aus den Messungen kein Zusammenhang zwischen eingestelltem Wunschabstand und Verzögerungszeitpunkt feststellen ließ. Die Berechnungsvorschrift für den Abstand bei Verzögerungsbeginn ergibt sich mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,96 und einer Standardabweichung von 4,0 Metern zu:

$$d_0 = 0,005 \cdot d_{ein} \cdot \Delta v_0 + 0,857 \cdot d_{ein} + 0,34 \cdot \Delta v_0 + 3,9 \quad (16)$$

**Bild 4.18** stellt die Verläufe für verschiedene Relativgeschwindigkeiten dar. Während ein Einfluss der Geschwindigkeit nicht festgestellt werden konnte, beginnt das ACC mit zunehmender Relativgeschwindigkeit später zu verzögern. Die Regressionsgeraden verschieben sich zu kleineren Abständen und verlaufen flacher. Dieses Verhalten ist auf eine systemimmanente Verifikationszeit zurückzuführen, die für eine eindeutige und sichere Erkennung der Situation notwendig ist. Ausgehend von den ersten Anzeichen eines Einscherens wird bei größeren Relativgeschwindigkeiten zwangsläufig mehr Abstand abgebaut, bis eine Reaktion erfolgen kann.



**Bild 4.18:** Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Verzögerungsbeginn infolge Einscherens bei ACC ( $R^2=0,96$ ,  $\sigma=4,0\text{m}$ )

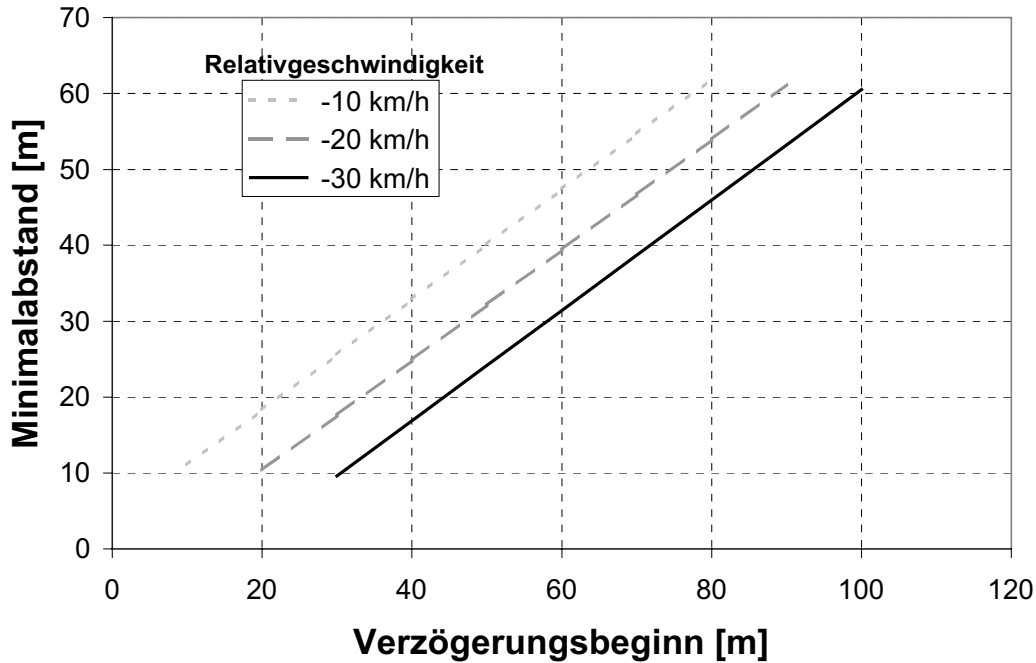
#### 4.3.2.2 Minimalabstand

Der in Einschersituationen vom ACC eingestellte Minimalabstand ist auf einem Signifikanzniveau von 1% linear vom Verzögerungsbeginn und der Relativgeschwindigkeit abhängig. Die Geschwindigkeit und die eingestellte Zeitlücke haben hierauf keinen Einfluss. Der Minimalabstand ergibt sich mit  $R^2=0,89$  und  $\sigma=4,7\text{m}$  zu:

$$d_{\min} = 0,727 \cdot d_0 + 0,8 \cdot \Delta v_0 + 11,8 \quad (17)$$

Je früher verzögert wird, desto früher ist die Verzögerung auch abgeschlossen und der Minimalabstand erreicht. Es fiel auf, dass vereinzelte Messpunkte stark vom durchschnittlichen Verhalten abweichen. Die Ursachen dafür konnten jedoch nicht geklärt werden.

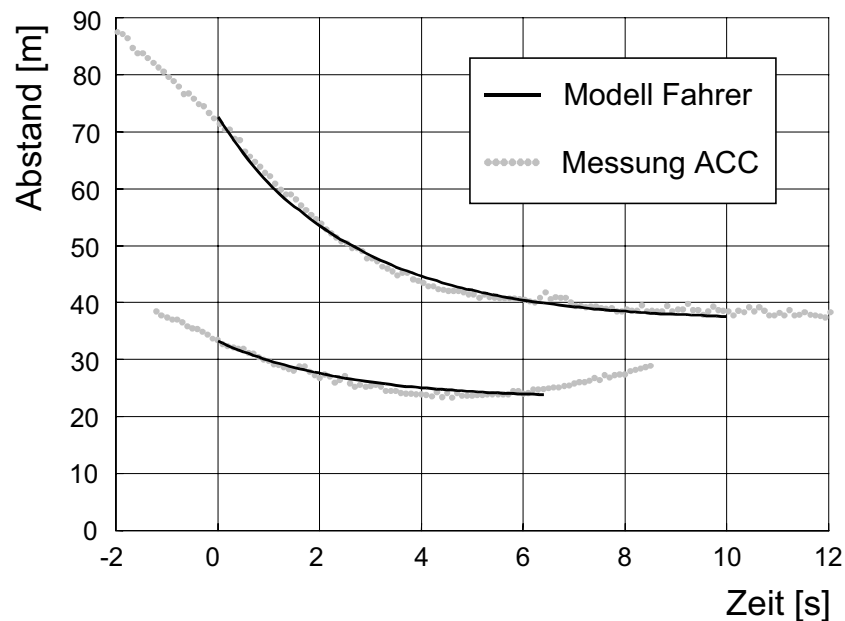
Die gewohnte Aufteilung nach verschiedenen Relativgeschwindigkeiten in **Bild 4.19** zeigt, dass die minimalen Abstände mit zunehmender Relativgeschwindigkeit weitestgehend unbeeinflusst vom Verzögerungsbeginn gleichmäßig kleiner werden.



**Bild 4.19:** Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf den Minimalabstand des ACC in Einschersituationen ( $R^2=0,89$  und  $\sigma=4,7\text{m}$ )

#### 4.3.2.3 Abstandsverlauf

Setzt man sowohl einen übereinstimmenden Verzögerungsbeginn als auch einen gleichen Minimalabstand voraus, so weisen ACC und Fahrer in Einschersituationen nahezu identische Abstandsverläufe auf (**Bild 4.20**).



**Bild 4.20:** Vergleich zweier gemessener Abstandsverläufe von ACC in Einschersituationen mit dem modellierten Verhalten der Fahrer bei Übereinstimmung von Verzögerungsbeginn und Minimalabstand

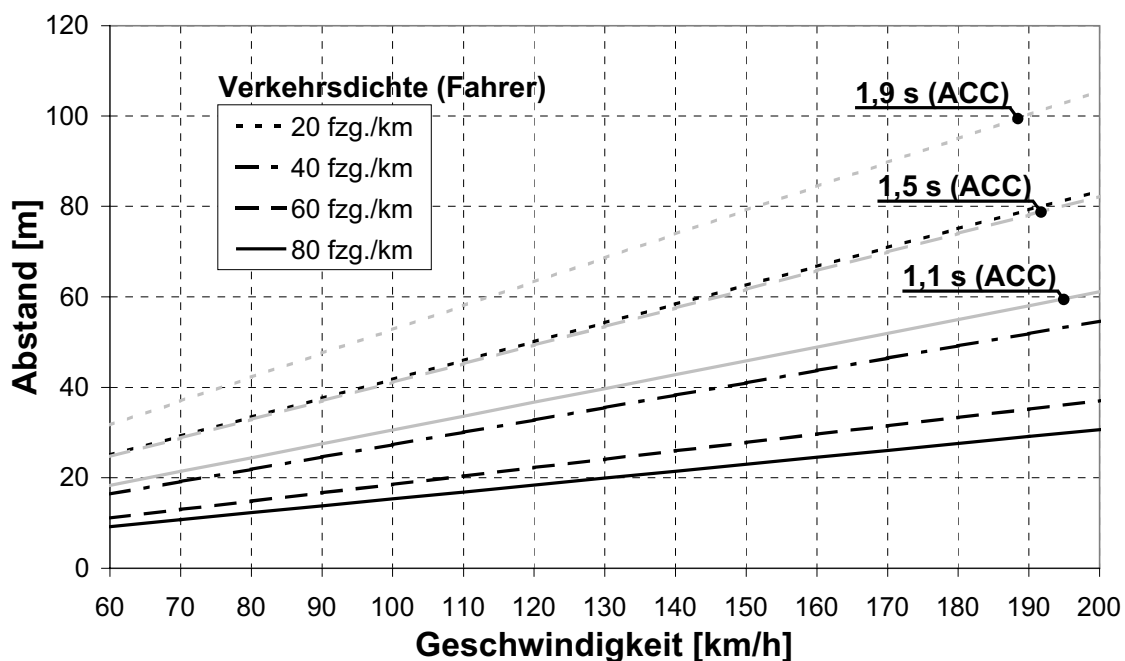
Für zwei beispielhafte Situationen mit unterschiedlichen Einschereabständen und Relativgeschwindigkeiten ist das gemessene Abstandsverhalten des ACC abgebildet. Dem sind die modellierten Abstandsverläufe gegenübergestellt, die sich nach Kap. 4.2.2.3 für das Verhalten der Fahrer ergeben haben. Dabei bezeichnet der Zeitpunkt Null Sekunden den Verzögerungsbeginn. Die beiden charakteristischen Beispiele zeigen bei einer maximalen Abweichung von etwas mehr als einem Meter eine so gute Übereinstimmung, dass auf eine gesonderte Modellierung der Abstandsverläufe des ACC verzichtet wurde. Gleichung 14 kann entsprechend auch für das Verhalten von ACC angewendet werden.

#### 4.4 Situativer Vergleich von Fahrer und ACC

Im Folgenden wird das Verhalten von ACC und Fahrer verglichen. Im vorangehenden Kapitel zeigten sich zumindest für Einschersituationen unter der Voraussetzung identischer Randbedingungen nahezu übereinstimmende Abstandsverläufe. Nun sollen Verzögerungsbeginn und Minimalabstand und darüber hinaus auch die modellierten Zusammenhänge der Folgefahrt einander gegenübergestellt werden.

##### 4.4.1 Folgefahrt

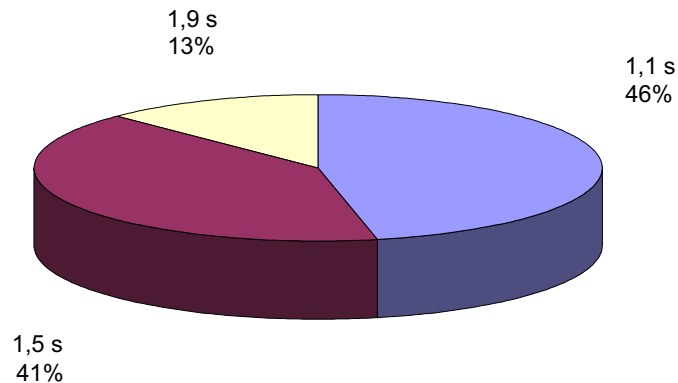
**Bild 4.21** deckt auf, inwieweit die Einstellmöglichkeiten von ACC das Folgeverhalten der Fahrer abdecken können. Die Proportionalität von Abstand und Geschwindigkeit gilt im Mittel für beide.



**Bild 4.21:** Vergleich der Zeitlücken von Fahrer und ACC bei Folgefahrt



Hinsichtlich der Zeitlücke können die Einstellungen von ACC das Fahrerverhalten lediglich bei kleinen Verkehrsdichten abbilden. Entsprechend wählen die Fahrer die größte Zeitlücke von 1,9 Sekunden auch nur in 13 Prozent der Zeit (**Bild 4.22**).



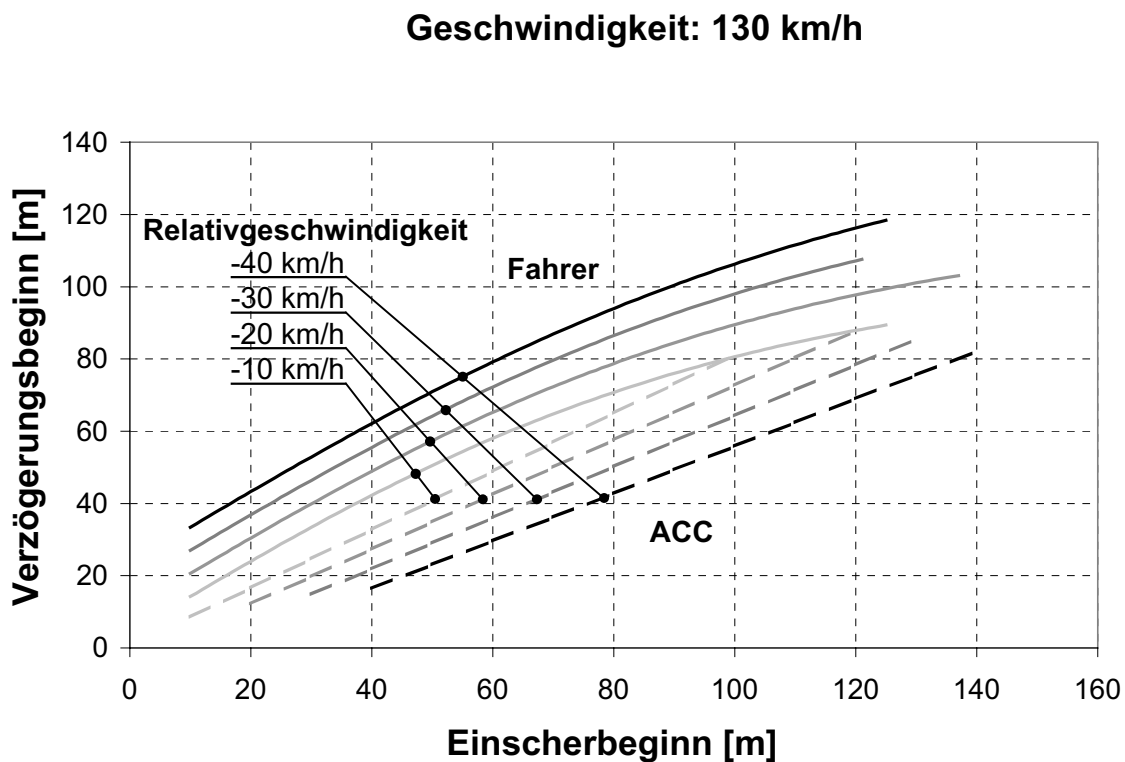
**Bild 4.22:** Zeitanteile der eingestellten Wunschabstände

Das dürfte die Fahrer auf Dauer dazu auffordern, gerade bei stärkerem Verkehr, dem eigentlichen Zielbereich einer Abstandsregelung verglichen mit einer herkömmlichen Geschwindigkeitsregelung, das ACC zu übersteuern oder gar auszuschalten. Auch im Falle niedriger Verkehrsdichten können die Wahlabstände nicht den Zweck einer dynamischen Anpassung an die Verkehrsverhältnisse erfüllen. Sie zielen eigentlich auf die Anpassung an interindividuell bevorzugte, zumindest jedoch längerfristig konstante Abstände ab. Die Verkehrsdichte in der betrachteten Form stellt jedoch eine vergleichsweise hochdynamisch sich ändernde Größe dar. Momentan auf der Nebenspur befindliche Fahrzeuge bestimmen ein intraindividuell streuendes Verhalten, woran sich ein ACC ohne weiteres adaptieren ließe. Auf die Akzeptanz würde sich das sicherlich vorteilhaft auswirken, wobei jedoch auch Fragen der Sicherheit, Gesetzgebung und Produkthaftung im Raum stehen.

#### 4.4.2 Einscheren

##### 4.4.2.1 Verzögerungsbeginn

In **Bild 4.23** ist der Verzögerungsbeginn für Fahrer und ACC bei einer einheitlichen Geschwindigkeit von 130 Kilometern pro Stunde aufgetragen. Grundsätzlich unterscheiden sich die Verläufe bereits in ihrem qualitativen Aussehen. Beim Fahrer nimmt der Verzögerungsbeginn degressiv über dem Einscherbeginn zu. Das ACC-Verhalten kann dagegen durch Geraden beschrieben werden, deren Steigungen den Verlauf der Fahrer in dem entsprechenden Einscherbereich noch recht gut repräsentieren.

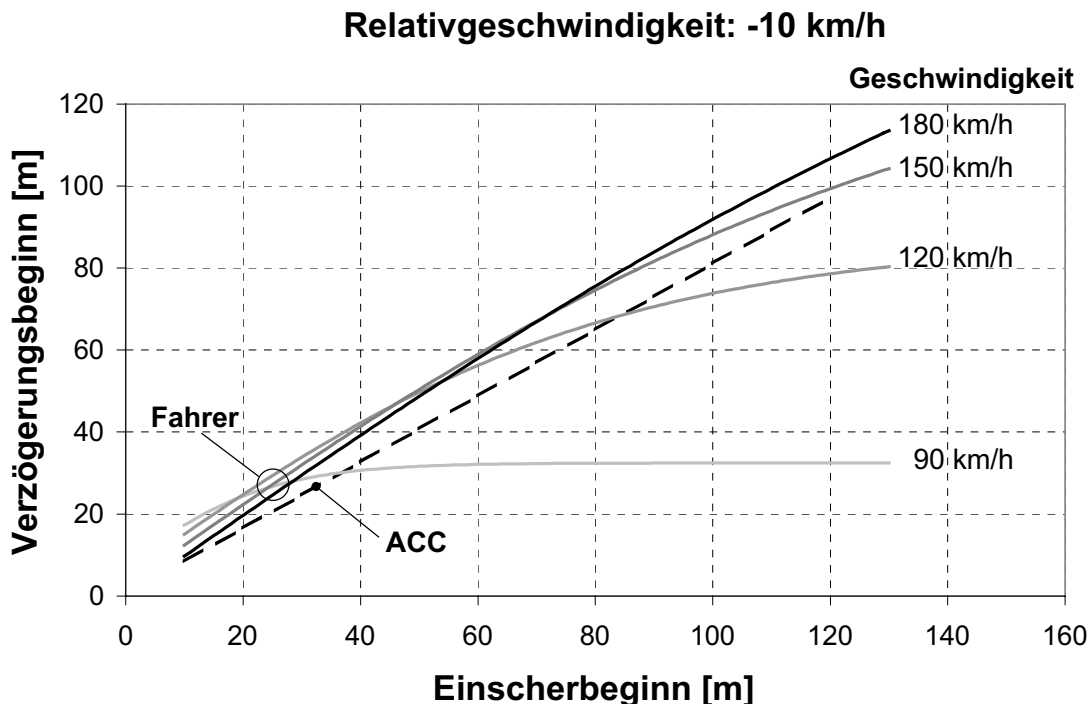


**Bild 4.23:** Vergleich des Verzögerungsbeginns von Fahrer und ACC infolge Einscherens in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h (Fahrer:  $R^2=0,83$ ,  $\sigma=12,5\text{m}$ ; ACC:  $R^2=0,96$ ,  $\sigma=4,0\text{m}$ )

Für kleine Relativgeschwindigkeiten ist auch der absolute Unterschied zwischen Fahrer und ACC sehr klein. Die Abweichungen liegen bei wenigen Metern und sind über dem Einscherbeginn konstant. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit driften die Verläufe jedoch auseinander und liegen auf unterschiedlichen Niveaus. Während der Fahrer immer früher reagiert, beginnt das ACC zusehends später zu verzögern. Bei Relativgeschwindigkeiten von 40 Kilometern pro Stunde steigen die Abstände, bei denen die Fahrer zu verzögern beginnen, bis auf das Doppelte an verglichen mit ACC.

Bild 4.23 untermauert häufig getätigte subjektive Aussagen, ACC würde beim Einscheren zu spät reagieren. Dieser Sachverhalt führt dazu, dass das System mit steigender Relativgeschwindigkeit zunehmend übersteuert wird, wie bereits in Bild 4.2 (S. 49) dargestellt wurde. Der Fahrer erkennt die Einscherabsicht früher und leitet die Verzögerung früher ein. Das ACC benötigt dagegen aufgrund seiner eingeschränkten Situationserkennung mehr Zeit, um mit ausreichender Sicherheit vom Einscheren ausgehen zu können.

Zuletzt war die Rede davon, dass ACC und Fahrer bei kleinen Relativgeschwindigkeiten ein nahezu identisches Verhalten aufweisen. Dies muss differenzierter betrachtet werden, da sich ein Einfluss der Geschwindigkeit überlagert. In **Bild 4.24** sind die modellierten Verläufe für eine Relativgeschwindigkeit von -10 Kilometern pro Stunde einander gegenübergestellt.

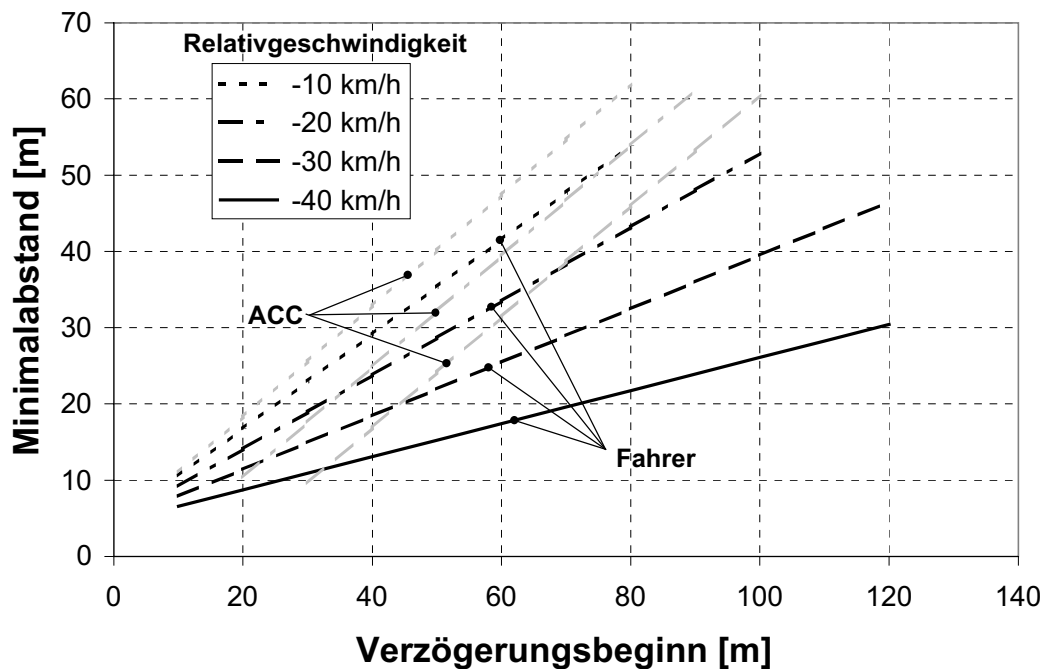


**Bild 4.24:** Vergleich des Verzögerungsbeginns von Fahrer und ACC infolge Einscherens in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei einer Relativgeschwindigkeit von -10 km/h (Fahrer:  $R^2=0,83$ ,  $\sigma=12,5\text{m}$ ; ACC:  $R^2=0,96$ ,  $\sigma=4,0\text{m}$ )

In erster Näherung bestätigt sich, dass Fahrer und ACC nahezu bei den gleichen Abständen mit der Verzögerung beginnen. Mit wachsenden Einscherabständen kommt beim Fahrer jedoch die degressive Charakteristik zum Tragen, deren Ursachen bereits in Kap. 4.2.2 diskutiert wurden. Dieses Verhalten ist bei kleinen Geschwindigkeiten am stärksten ausgeprägt, so dass der durchschnittliche Fahrer bei großen Einscherabständen später als das ACC zu verzögern beginnt. Problematisch erscheint diese Diskrepanz eher unter dem Aspekt der Akzeptanz als der Sicherheit.

#### 4.4.2.2 Minimalabstand

Wie bereits ausgeführt, zeigt sich weder beim Fahrer noch beim ACC ein Einfluss der Geschwindigkeit auf die Wahl des minimalen Abstandes infolge einscherender Fahrzeuge. Ein Einfluss der Relativgeschwindigkeit ist dagegen vorhanden und soll anhand von **Bild 4.25** diskutiert werden.



**Bild 4.25:** Vergleich des Minimalabstandes in Einschersituationen von Fahrer und ACC in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit (Fahrer:  $R^2=0,56$ ,  $\sigma=11,4\text{m}$ ; ACC:  $R^2=0,89$ ,  $\sigma=4,7\text{m}$ )

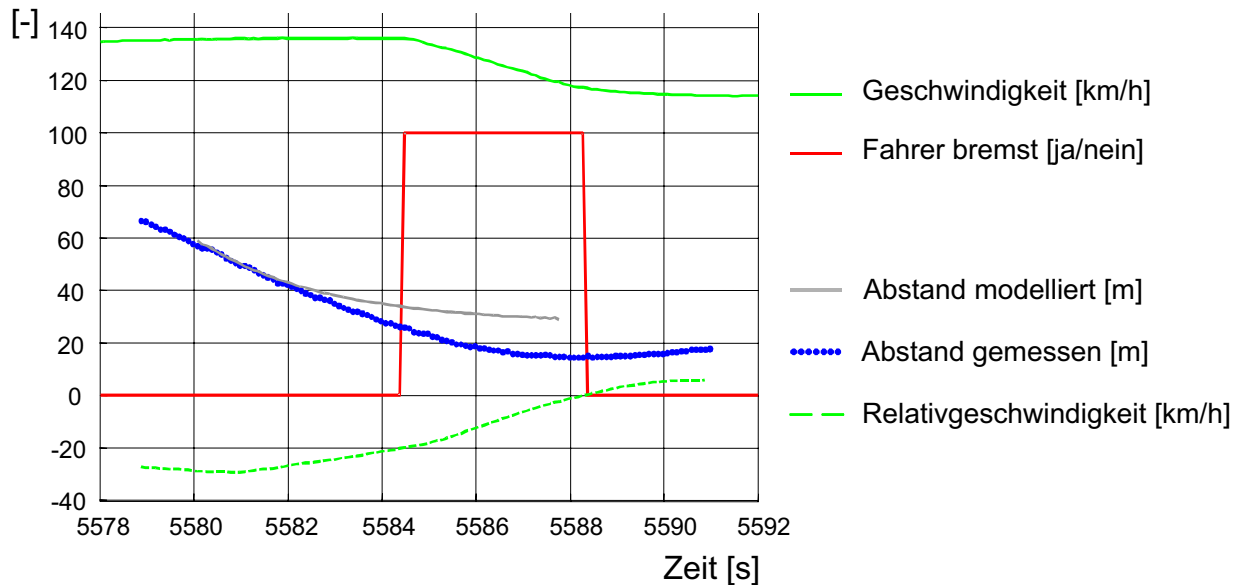
Ausgehend von kleinen Relativgeschwindigkeiten lässt sich feststellen, dass das ACC geringfügig größere Minimalabstände einstellt. Höhere Relativgeschwindigkeiten führen sowohl beim Fahrer als auch beim ACC zu kleineren Abständen. Die Regressionsgeraden des ACC werden nahezu parallel verschoben, so dass der Minimalabstand unabhängig vom Verzögerungsbeginn abnimmt. Die Verläufe des Fahrers dagegen verdrehen sich in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit und ändern ihre Steigung über dem Verzögerungsbeginn. Insbesondere bei großen Relativgeschwindigkeiten ergeben sich in Verbindung mit einem frühen Verzögerungsbeginn deutlich kleinere Abstände für den Fahrer. Der Grund dürfte nicht nur in der komfortorientierten Verzögerung zu finden sein. Vielmehr spielen hier auch die Motive des Fahrers eine bedeutende Rolle, mit verkürzten Abständen gewisse Reaktionen der vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer antizipieren oder gar provozieren zu wollen.

Es darf jedoch nicht der Eindruck entstehen, dass der Fahrer in vergleichbaren Situationen die kleineren Abstände einstellt. Wie bereits nachgewiesen wurde, beginnt der Fahrer früher, d.h. bei größeren Abstandswerten mit der Verzögerung. Bezieht man den Minimalabstand auf den Verzögerungsbeginn, kehren sich die Verhältnisse um. Im Grunde genommen versucht das ACC seine später eingeleitete Reaktion durch eine höhere Verzögerung teilweise wieder auszugleichen, was im nächsten Abschnitt nochmal verdeutlicht wird.

#### 4.4.2.3 Gesamtbetrachtung einer Einschersituation

Zum Abschluss des Vergleichs von Fahrer und ACC werden die modellierten Verläufe, die für das Fahrerverhalten ermittelt worden sind, an einem Beispiel angewendet. Das soll keinen repräsentativen Charakter haben, da dies ohnehin Bestandteil der Einzelbetrachtungen war. Aus der Verknüpfung der drei Modellblöcke ergibt sich jedoch ein anschaulicher Überblick über die Unterschiede von Fahrer und ACC in Einschersituationen.

In **Bild 4.26** sind die Messverläufe einer Einschersituation dargestellt. Zunächst ist das ACC eingeschaltet und regelt eine Wunschgeschwindigkeit von 140 Kilometern pro Stunde ein. Ein einscherendes Fahrzeug veranlasst den Fahrer, bei 5584,5 Sekunden und einem Abstand von 25 Metern bremsend einzugreifen, da das ACC bis zu diesem Zeitpunkt keine Verzögerung eingeleitet hat. Im weiteren Verlauf bremst der Fahrer, bis die Relativgeschwindigkeit bei 5588,5 Sekunden auf Null abgebaut ist und der minimale Abstand 15 Meter beträgt.



**Bild 4.26:** Anwendung des Fahrermodells für Einschersituationen auf einen konkreten Fall

Die modellierte Reaktion eines durchschnittlichen Fahrers ist durch die graue Kurve gekennzeichnet. Es wird vergleichsweise früh bereits bei einem Abstand von knapp 60 Metern reagiert. Die Verzögerung wird entsprechend sanft eingestellt, was sich in einem deutlich flacher gekrümmten Abstandsverlauf äußert. Zum Zeitpunkt von 5584,5 Sekunden, an dem eingegriffen wurde, hätte der Abstand mit 35 Metern bereits 10 Meter mehr betragen. Abgesehen davon hätte sich die Relativgeschwindigkeit auch schon deutlich verringert, so dass ein Eingreifen nicht mehr notwendig gewesen wäre. Abgebaut wäre die Relativgeschwindigkeit etwa zur gleichen Zeit wie im realen Fall, jedoch hätte mit knapp 30 Metern fast der doppelte Minimalabstand zum Vorfahrenden bestanden.

Dieses Beispiel veranschaulicht die Diskrepanz zwischen Fahrermodell und untersuchtem ACC-Verhalten. Der Fahrer beginnt früher zu verzögern, erreicht einen größeren

Minimalabstand und braucht nicht so stark zu verzögern. Dies zeigt theoretische Potentiale auf, die jedoch auch hohe Anforderungen an die Sensorik stellen.

#### 4.5 Sicherheit bei ACC-Unterstützung

Im vorangegangenen Kapitel wurden Fahrer und ACC anhand einer mikroskopischen Betrachtung der Situationen, die streng an der Vergleichbarkeit der Randbedingungen ausgerichtet war, einander gegenübergestellt. Dies bot zur Beurteilung der Sicherheit zunächst den Vorteil, Defizite identifizieren und Maßnahmen ableiten zu können. Situationen, in deren Verlauf es beispielsweise zu einem erneuten Spurwechsel eines der beteiligten Fahrzeuge kam, wurden soweit ausgeschlossen. Gerade hier steckt jedoch ein gewisses Gefährdungspotential, da die Antizipation solcher Vorgänge häufig im Vorgriff auf den erwarteten Ablauf zu einer Verkürzung von Abständen geführt hat. Darüber hinaus soll die Verhaltensbeurteilung auf die Rückwirkungen im Umgang mit ACC ausgedehnt werden. Daher ist es von Interesse, die Sicherheit umfassender zu beurteilen.

Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich auf die Situationsklassen, ohne die zugrunde liegenden Verhältnisse wie in den Kapiteln 4.2 bis 4.4 im Detail zu beleuchten. Unabhängig von den genauen Situationsbedingungen beschreiben Time-to-collision und Zeitlücke den momentanen Gefährdungszustand. Demzufolge stellt die zeitliche Häufigkeit dieser Zustände ein Gefährdungsmaß dar, das sich für die konventionelle Fahrtätigkeit und das Fahren mit ACC vergleichen lässt. Die Darstellung erfolgt in Form einer zweidimensionalen relativen Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von Time-to-collision und Zeitlücke nach der Vorstellung von Bild 3.7 (S. 46). Die zeitliche Häufigkeit bestimmt sich analog zu Höhenlinien auf einer Landkarte, d.h. gleiche Häufigkeiten sind einheitlich eingefärbt. Dabei ist zu beachten, dass die Skalierung einer relativen Häufigkeit entspricht. Absolute Häufigkeiten würden sich aus dem Produkt der Fläche und ihrer relativen Häufigkeit bestimmen lassen, sind für einen direkten Vergleich jedoch nicht von Interesse. In den folgenden Diagrammen handelt es sich um zeitliche Häufigkeiten, die auf die Gesamtdauer der zugrundeliegenden Situationen bezogen wurden.

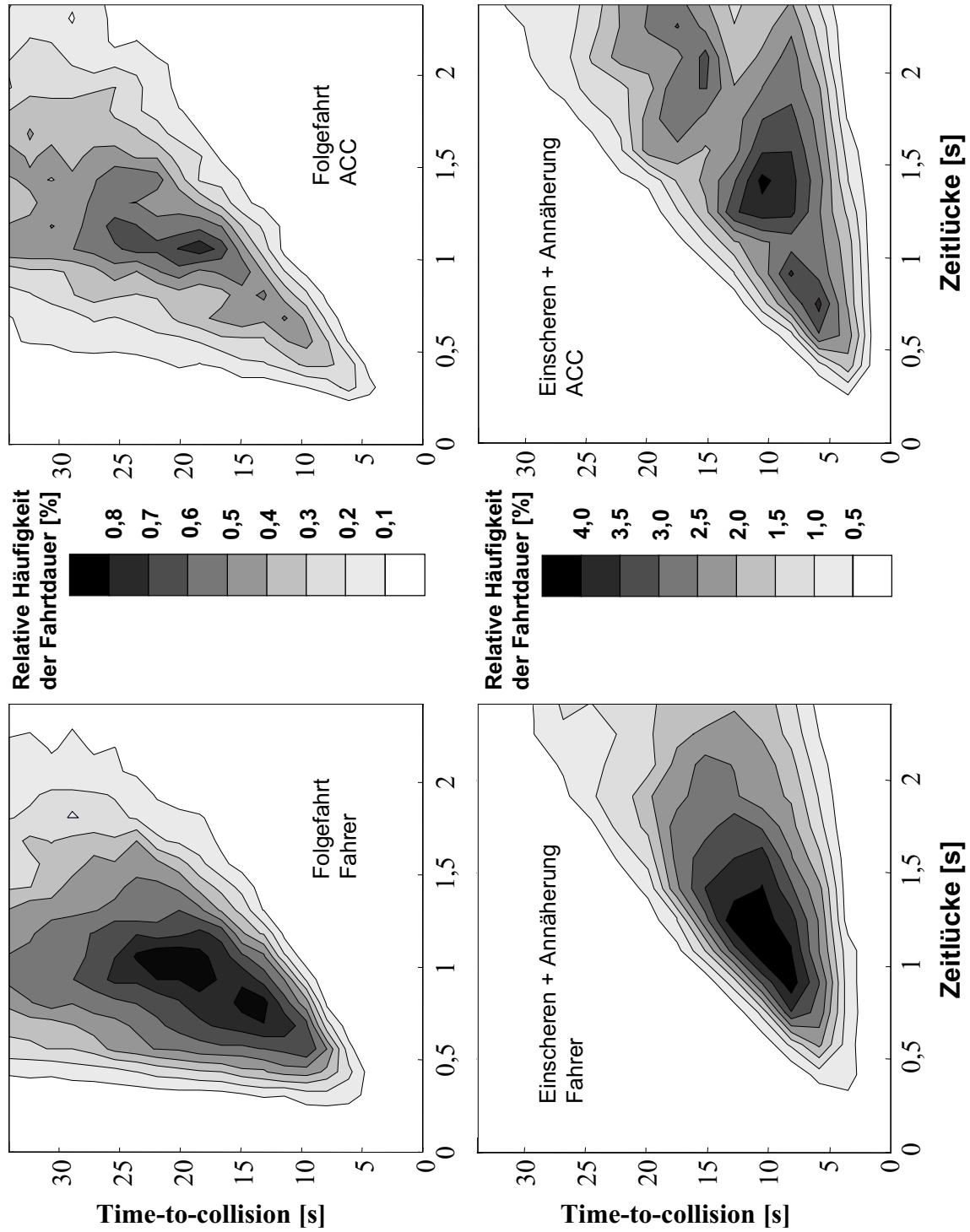
In einem ersten Schritt werden die Situationsklassen miteinander verglichen, um deren Bedeutung unter dem Aspekt der Sicherheit nochmals zu unterstreichen. Dazu werden Einscheren und Annäherung zusammengefasst, die sich abgesehen vom auslösenden Moment nicht weiter unterscheiden und mit dem Auflaufen auf ein vorausfahrendes Fahrzeug charakterisiert werden können. Im Gegensatz dazu ist die Folgefahrt durch verschwindend geringe Geschwindigkeitsunterschiede gekennzeichnet, kommt jedoch auch wesentlich häufiger vor. Da sowohl die zeitliche Komponente als auch das Gefährdungsmaß die Sicherheit mitbestimmen, erscheint ein Vergleich dieser gegensätzlichen Situationsklassen angeraten.

Folgefahrten und Einscheren/Annäherung decken komplett unterschiedlich Bereiche ab (**Bild 4.27** links). Die Unterschiede fallen hinsichtlich der Zeitlücken weniger ins Gewicht. Der Schwerpunkt liegt bei Einscheren/Annäherung etwas über einer Sekunde gegenüber knapp

unter einer Sekunde im Fall der Folgefahrten. Demgegenüber liegen die Time-to-collision bei Einscheren/Annäherung jedoch weit unter denen der Folgefahrt, die mit großen bis unendlichen Werten in dieser Hinsicht als unkritisch bewertet werden kann. Dies bestätigt die stärkere Gefährdung in Situationen des Einscherens und der Annäherung, zumal die Time-to-collision als die kritischere Größe anzusehen ist.

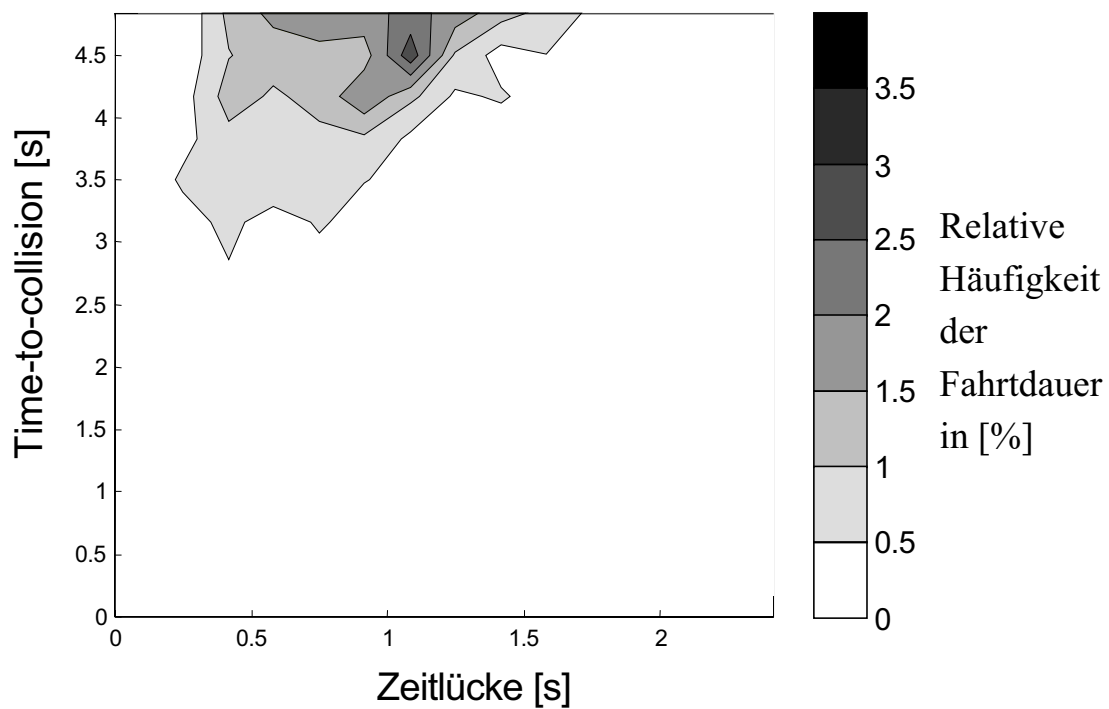
Zunächst aber sollen die Auswirkungen des Einsatzes von ACC auf die Folgefahrten untersucht werden, da auch das latente Gefahrenniveau nicht vernachlässigt werden darf. Dazu lassen sich die zeitlichen Häufigkeiten in Bild 4.27 (oben) miteinander vergleichen. Es zeigt sich ein unverkennbar positiver Einfluss des ACC, da sich die Zeitanteile sichtbar in unkritischere Bereiche verschieben. Nicht nur dem Drängeln zuzurechnende kleine Zeitlücken bei großen Time-to-collision-Werten werden in geringerem Maße frequentiert, auch die absolute Häufigkeit im betrachteten Ausschnitt nimmt grundsätzlich ab. Die Konzentration bei einer Zeitlücke von gut einer Sekunde weist auf die Nutzung des kleinsten einstellbaren Wunschabstandes hin. Der mittlere Wunschabstand von 1,5 Sekunden verschiebt die Time-to-collision bereits in so hohe Bereiche, dass sie teils außerhalb des hier als sicherheitsrelevant erachteten Fensters liegen.

Ein grundlegend anderer Sachverhalt erschließt sich aus Bild 4.27 (unten) für Einscheren und Annäherung. Die abgedeckten Bereiche erscheinen qualitativ ähnlich, wenn auch hinsichtlich des ACC Konzentrationen jeweils im Bereich knapp unterhalb der wählbaren Zeitlücken zu beobachten sind. Damit verteilen sich die Häufigkeiten etwas mehr, ohne jedoch auf offenkundige Unterschiede in den Absolutwerten schließen zu lassen. Einerseits handelt es sich bei der Auslösung der Situationen um statistisch verteilte Ereignisse, die fremd initiiert werden und kaum dem Einfluss des Fahrers bzw. ACC unterliegen. Andererseits kann die Antizipation des Ausscherens von Fahrzeugen, auf die man aufläuft, zu verkürzten Abständen führen. Diesbezüglich lassen sich jedoch keine Aussagen festmachen.

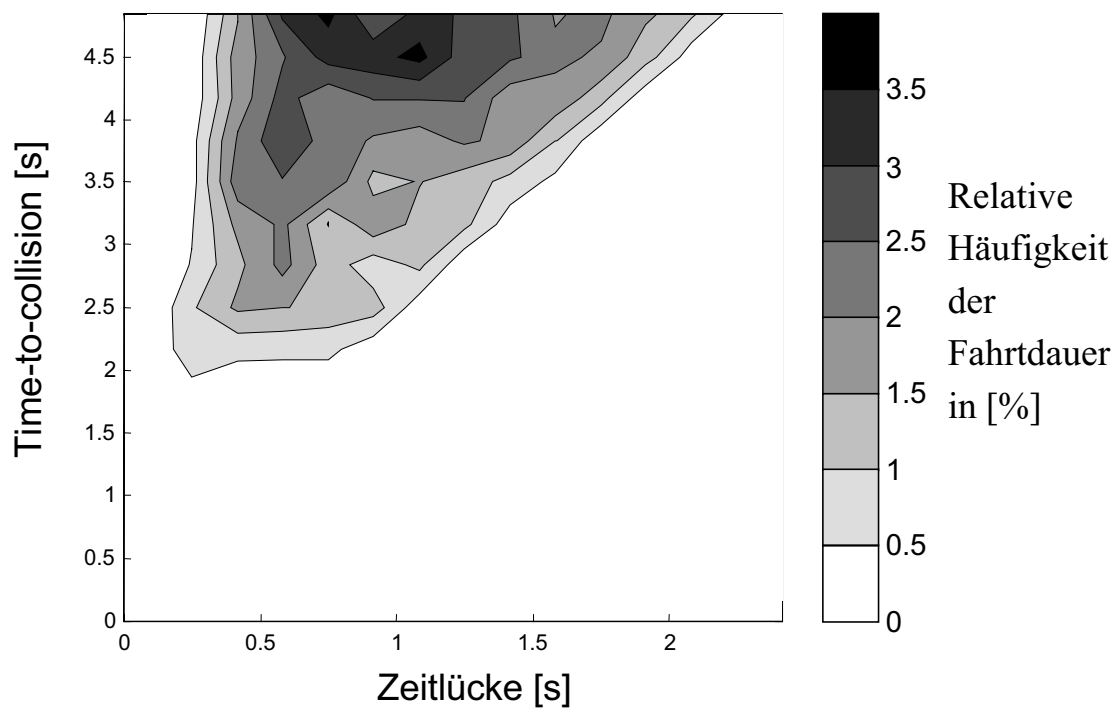


**Bild 4.27:** Relative Häufigkeitsverteilung von Zeitlücke und Time-to-collision bei Folgefahrt und Einscheren/Annäherung für Fahrer und ACC





**Bild 4.28:** Relative Häufigkeitsverteilung als Funktion von Zeitlücke und Time-to-collision für Annäherungen und Einschersituationen der Versuchsreihe I (Fahraufgabe ohne ACC)



**Bild 4.29:** Relative Häufigkeitsverteilung als Funktion von Zeitlücke und Time-to-collision für Annäherungen und Einschersituationen der Versuchsreihe II (Fahraufgabe mit ACC)

Konzentriert man den Blick auf kleine Time-to-collision, dann deutet sich an, was in **Bild 4.28** und **Bild 4.29** vergrößert dargestellt ist. Die kleinsten Time-to-collision liegen bei ACC-Einsatz mit zwei Sekunden um eine Sekunde niedriger als bei der herkömmlichen Fahrweise. Außerdem werden Werte unterhalb von fünf Sekunden maßgeblich häufiger eingestellt. Im Zusammenhang dieser Vorfälle kam es nie zu solch hohen Verzögerungen, dass von einem Notmanöver gesprochen werden kann. Die Ereignisse kündigten sich an, ohne die Fahrer zu überraschen. Auch ihren subjektiven Aussagen zufolge fühlten sie nie, überfordert worden zu sein oder gar die Kontrolle aus der Hand gegeben zu haben [1]. Dennoch deuten die Umstände auf eine höhere Gefährdung hin.

An dieser Stelle schließt sich der Kreis zu den Ergebnissen aus der gesonderten Analyse der Einschersituationen. Die spätere Situationserkennung des Abstandsregelungssystems kann sich in kritischeren Abständen äußern, sofern der Fahrer, ob unbewusst oder bewusst, nicht eingreift und dieses verhindert. Nähere Umstände hierzu werden in Kap. 5.3 diskutiert.

## 4.6 Fazit

Die Bedeutung einer Situation bemisst sich sowohl an der zeitlichen Häufigkeit als auch an den Anforderungen, die an die Fahrtätigkeit gestellt werden. Ein Überblick über die Zeitanteile auf Autobahnen zeigt, dass die Folgefahrt hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug mit über 40 Prozent ähnlich stark vertreten ist wie die freie Fahrt. Dabei verhalten sich die eingestellten Abstände über alle Fahrer betrachtet proportional zur Geschwindigkeit, so dass die Zeitlücke eine geeignete Form der Beschreibung darstellt.

Der gesetzlich vorgeschriebene Sicherheitsabstand in Höhe von 1,5 Sekunden, der knapp dem halben Tachowert in Metern entspricht, wird in 83 Prozent der Folgefahrt nicht eingehalten. Auch die laut Bußgeldkatalog relevante Grenze von 0,9 Sekunden wird in 41 Prozent der Zeit unterschritten. Das Risiko, das die Fahrer bei derart kleinen Abständen eingehen, lässt sich auf den Einfluss der Verkehrsdichte zurückführen. Je mehr Fahrzeuge sich auf der rechten Spur im Abstand bis zu dem in der eigenen Fahrspur vorausfahrenden Fahrzeug befinden, desto kleiner sind die gewählten Abstände. Offensichtlich veranlasst die Möglichkeit einscherender Fahrzeuge die Fahrer zu kleineren Abständen. Der Grenzwert von 0,55 Sekunden wird ab einer Fahrzeugdichte von 80 Fahrzeugen pro Kilometer erreicht. Dies spiegelt den Zielkonflikt von gesetzlichen Bestimmungen und realen Verkehrsverhältnissen wider. Damit ergibt sich für die Auslegung von ACC die Schwierigkeit, dem Nutzer ein ebenso gesetzeskonformes wie auch akzeptierbares System zur Verfügung zu stellen.

Das Einscheren langsamerer Fahrzeuge in die eigene Spur tritt mit einem Zeitanteil von gut 2 Prozent deutlich seltener auf als die Folgefahrt. Diese Situation ist jedoch als kritischer einzustufen, da ohne eine zeitgerechte Reaktion zwangsläufig eine Kollision droht. Das Verhalten in Einschersituationen lässt sich in drei Blöcke einteilen: den Abstand bei Beginn der Verzögerung, den zeitlichen Verlauf des Abstandes und den minimalen Abstand bei

angeglichener Geschwindigkeit. Als maßgebliche Einflussfaktoren werden Einscherabstand, Relativgeschwindigkeit und Geschwindigkeit identifiziert.

Zunächst ist der Zeitpunkt maßgebend, wann mit der Verzögerung begonnen wird. Diesbezüglich zeigt sich für den Fahrer, dass er mit zunehmender Relativgeschwindigkeit und ansonsten vergleichbaren Verhältnissen bei größeren Abständen bereits zu verzögern beginnt. Dies mag nicht weiter verwundern, da u.a. Positionsänderungen des einscherenden Fahrzeugs und dessen Auflaufen auf ein weiteres Fahrzeug Anzeichen liefern, die den Fahrer die Verzögerung in Abhängigkeit von seinem persönlichen Sicherheitsempfinden einleiten lassen. Dieses Verhalten unterscheidet sich jedoch grundsätzlich vom ACC, das das Einscheren später erkennt. Die Verzögerung setzt mit zunehmender Relativgeschwindigkeit bei immer kleineren Abständen ein. Darauf lässt sich zurückführen, dass die Fahrer bei ACC-Betrieb und Einschersituationen mit Relativgeschwindigkeiten oberhalb von 45 Kilometern pro Stunde in allen Fällen eingegriffen haben.

Neben dem Verzögerungsbeginn werden auch der zeitliche Verzögerungsverlauf und der minimale Abstand modelliert, der das Ende der Einschersituation markiert. Bei letzterem handeln die Fahrer in dem Zielkonflikt, einerseits ausreichende Abstände einhalten zu müssen und andererseits komfortabel verzögern zu wollen. Je später mit der Verzögerung begonnen wird, desto kleiner wird auch der minimale Abstand. Dabei richtet sich das Verhalten daran aus, wie kritisch eine Situation erscheint, d.h. sowohl mit steigender Relativgeschwindigkeit als auch mit späterem Verzögerungsbeginn fällt die Minderung des Minimalabstandes geringer aus. Die Geschwindigkeit selbst hat darauf keinen Einfluss.

Annäherungen ließen sich in ähnlicher Weise nicht näher untersuchen. Einerseits war der Messbereich des Radarsensors zu klein, so dass die Fahrer in den überwiegenden Fällen bei der Erfassung des vorausfahrenden Fahrzeugs bereits verzögerten. Andererseits erfolgten keine einheitlichen Reaktionen, die sich eindeutig auf die Annäherung beziehen ließen. Die Situation ließ den Fahrern zu große Spielräume.

Die flexible und mehrkanalige Situationserfassung zeichnet den Menschen in seiner grundlegenden Fähigkeit aus, den Ablauf der Geschehnisse gewissermaßen antizipieren zu können. Hier scheint er einem technischen System wie dem ACC überlegen zu sein. Dennoch führt die Antizipation auch dazu, Abstände stark zu verkleinern. Beispielsweise versuchen die Fahrer mitunter, andere Fahrzeuge am Einscheren zu hindern, sie wieder zum Ausscheren zu bewegen oder nehmen deren Ausscheren bzw. eigene Spurwechsel vorweg, indem sie die Abstände schon vorher verkürzen.

Eine diesbezüglich situationsübergreifende Beurteilung der Sicherheit rundet den Vergleich von Fahrer und ACC ab. Aufbauend auf bekannten Betrachtungsweisen zur Beschreibung der Sicherheit wird die Kombination von Zeitlücke und Time-to-collision als die Größe erachtet, die eine objektive Analyse der Sicherheit erlaubt. Dies vermittelt auch einen Einblick, wie sich die Nutzung von ACC auf das Abstandsverhalten auswirkt. Hinsichtlich der Folgefahrt zeigt sich ein positiver Einfluss, da sich die Zeitanteile kleiner Zeitlücken und Time-to-collision in

deutlich unkritischere Bereiche verschieben. Im Gegensatz dazu führt der Einsatz von ACC bei Annäherungen und Einschersituationen häufiger zu kleineren Time-to-collision-Werten. Weder subjektive Aussagen noch objektive Einschätzungen lassen in diesen Fällen jedoch von unfallkritischen Situationen sprechen.

## **5 Diskussion**

### **5.1 Beurteilung der Methodik**

Der Aufwand der umfassenden Feldversuche mit externen Probanden erklärt sich aus der Notwendigkeit, Daten zum Abstandsverhaltens zusammenzutragen, die in dieser Menge und Qualität aufgrund der lange Zeit fehlenden technischen Voraussetzungen nicht erfasst werden konnten. In Anbetracht der Analyse möglichst repräsentativer Verkehrszustände wurde auf den Einsatz von instruierten Begleitfahrzeugen, die reproduzierbare Verkehrsbedingungen schaffen, verzichtet.

Die Schwierigkeit der durchgeführten Untersuchungen besteht in der Variabilität menschlichen Verhaltens und der Komplexität von Verkehrsvorgängen, beides vom Faktor Zufall stark geprägte Größen. Nur ein systematischer Ansatz und eine strenge methodische Vorgehensweise sind hier in der Lage, Ergebnisse hervorzubringen, die den Anforderungen genügen können und die gewünschte Aussagekraft gewährleisten. Ein Schwerpunkt lag auf der zeitökonomischen Auswertung der Versuchsdaten. An dieser Stelle musste verstärkt Zeit in die Programmierung zur Datenaufbereitung und Auswertung investiert werden, um neben der umfassenden Berücksichtigung von potentiellen Einflüssen auch eine statistische Absicherung der Ergebnisse zu erzielen.

#### **5.1.1 Versuchsstrecke**

Die Versuchsstrecke stellt grundsätzlich ein wichtiges Instrument dar, die Anforderungen an den Fahrer mitzubestimmen. Sie sollte daher repräsentativ sein, um die Übertragbarkeit des Verhaltens zu gewährleisten. Dies ist jedoch nicht eindeutig zu bewerkstelligen, da regionale Unterschiede eines ohnehin komplexen Straßennetzes die Frage aufkommen lassen, was die Strecke repräsentieren soll. In diesem Zusammenhang müsste die Grundgesamtheit aller Streckenanteile auch danach gewichtet werden, wie unterschiedlich stark sie genutzt werden.

Die Fahrten fanden ausschließlich auf Autobahnen statt, um dem Einsatzgebiet der auf dem herkömmlichen Tempomaten aufbauenden Abstandsregelung am nächsten zu kommen. Lange Abschnitte unter Vermeidung häufiger Autobahnwechsel ermöglichten eine gute zeitliche Ausnutzung und einen kontinuierlichen ACC-Betrieb.

Die Vorauswahl der Verkehrsbelastungen konnte zur Gestaltung der Versuchsstrecke kaum beitragen. Tagesganglinien waren nur für sehr kleine Teilbereiche des Verkehrsnetzes verfügbar. Abgesehen davon können sie aufgrund ihrer veränderlichen Tages- und Ferienzeitabhängigkeit keine repräsentativen Aussagen liefern. Im Fall der ersten

Versuchsreihe konnte diese Lücke durch die fahrzeugautonome Messung der momentanen Verkehrsdichte geschlossen werden. Die zweite Versuchsreihe bot diese Möglichkeit nicht. Hier musste auf die simple Auswahl der identischen Tageszeiten unter Vermeidung der Urlaubszeit zurückgegriffen werden.

Staus und bekannte Brennpunkte konnten bis auf wenige Ausnahmen erfolgreich vermieden werden. Baustellen ließen sich bereits bei der Auswahl der Versuchsstrecke nicht vollständig ausschließen, entstanden zuweilen aber auch im Laufe einer Versuchsphase. Unnatürliche Einflüsse infolge von Staus und Baustellen spielten trotzdem keine Rolle, da diese Fahrabschnitte anlässlich der Videobearbeitung klassifiziert und von der Auswertung ausgenommen wurden.

### **5.1.2 Probanden**

Als wesentliche Kriterien zur Klassifizierung von Fahrern lassen sich nach [20] Fahrerfahrung, Alter und Geschlecht anführen. Hinsichtlich Alter repräsentieren die eingesetzten Versuchspersonen die typische Verteilung der BMW 5er-Reihe ab Baujahr 1996. Auf eine maßstabsgetreue Wiedergabe der Altersverteilung musste aufgrund der Vertraulichkeit der vom Hersteller zur Verfügung gestellten Daten verzichtet werden. Die Fahrerfahrung streute in natürlicher Abhängigkeit vom Alter zwischen 150.000 und über 1.000.000 Kilometer. Frauen haben an den Versuchen mit einer Ausnahme nicht teilgenommen. Dies geschah zwangsläufig aus Gründen der mangelnden Verfügbarkeit.

Die Beschränkung, dass alle Versuchspersonen denselben Fahrzeugtyp gewohnt waren, wurde bewusst in Kauf genommen, um eine Gewöhnungsphase mit Rückwirkungen auf die Versuchsergebnisse zu vermeiden. Die geringen Unterschiede von 5er und 7er BMW hinsichtlich Cockpit und Fahrzeugabmessungen dürften vernachlässigbare Auswirkungen gehabt haben. Zusammenhänge zwischen Fahrzeugtyp und Fahrerverhalten werden im Volksmund häufig unterstellt, Erkenntnisse lagen hierzu nicht vor. Stattdessen wurde jedoch auf eine gleichmäßige Verteilung der Fahrer hinsichtlich ihrer grundsätzlichen und aktuellen Erfahrungen mit dem herkömmlichen Tempomaten geachtet, da mit Auswirkungen auf die Akzeptanz und den Umgang mit ACC zu rechnen ist [44].

### **5.1.3 Versuchsfahrzeuge**

Die Versuchsfahrzeuge waren angesichts der Anforderungen an ihre technische Ausstattung vorgegeben. Reichte in der ersten Versuchsreihe die Messung der Abstände und Positionen vorausfahrender Fahrzeuge aus, musste für die zweite Versuchsreihe auch eine zufriedenstellende Regelung der Abstände und Geschwindigkeiten gewährleistet sein. Dazu konnte auf den Serienstand eines von BMW inzwischen eingeführten Abstandsregelungssystems zurückgegriffen werden, dessen breite Anwendung die Repräsentativität der Untersuchungen stützte. Unterschiede zwischen den Systemen verschiedener Hersteller betreffen in erster Linie Anzeige- und Bedienelemente, während sich die objektiven Leistungsdaten wie Geschwindigkeitsbereiche, wählbare Abstände und

maximale Beschleunigungs- und Verzögerungswerte nur geringfügig unterscheiden. Auch, wenn die technischen Rahmenbedingungen vergleichbar sind, eine Differenzierung des Systemverhaltens nach herstellerepezifischen Konfigurationen und Charakteristika können die vorgestellten Untersuchungen nicht leisten.

Übereinstimmende Fahrzeugtypen wären vor dem Hintergrund einer guten Vergleichbarkeit beider Versuchsreihen wünschenswert gewesen, ließen sich unter den gegebenen Umständen jedoch nicht realisieren. Die beiden eingesetzten Fahrzeuge, ein 5er und ein 7er BMW, waren sich in der Bedienung relativ ähnlich. Die Abmessungen wichen etwas voneinander ab, sollten aber bei Autobahnfahrten mit normalen Fahrspurbreiten einen unbedeutenden Einfluss auf das Fahrerverhalten haben.

Die hohe Motorleistung der Fahrzeuge schränkte den Verhaltensspielraum der Fahrer kaum ein, lässt jedoch auch einen gewissen Aufforderungscharakter nicht ausschließen. Entsprechende Auswirkungen infolge der unterschiedlichen Motorisierung beider Versuchsreihen war im Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen nicht erkennbar, so dass auch hinsichtlich des Abstandsverhaltens etwaige Einflüsse aus dem ungleichen Beschleunigungsvermögen vernachlässigbar erscheinen. Abweichende Verzögerungen beider Fahrzeugtypen durch unterschiedliche Schleppmomente spielten für die Auswertung der Einsichersituationen keine Rolle. Es wurde grundsätzlich der Verzögerungsverlauf als Summe aus Fahrwiderständen, Motorbremse und Bremsbetätigung betrachtet, der den Willen des Fahrers maßgeblich repräsentieren sollte. Etwaige Reizschwellen zur Betätigung der Bremse fanden keine Berücksichtigung.

Messtechnik und Kameras wurden in beiden Fahrzeugen unauffällig verbaut, um Rückwirkungen auf das Verhalten des Fahrers oder anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Die Erweiterung um eine Abstandsmessung zu hinterherfahrenden Fahrzeugen wäre aus verschiedenen Gründen ratsam, obwohl sie mit zusätzlichen Kosten und Aufwand verbunden ist. Unter versuchsökonomischen Aspekten ergäbe sich bei gleicher Versuchsdauer die doppelte Menge an auswertbaren Daten, wenn der Einfluss individueller Fahrereigenschaften wie im vorgestellten Fall unberücksichtigt bleibt. Auf diese Weise bietet sich auch die Möglichkeit, das Reaktionsverhalten infolge aufleuchtender Bremslichter und Blinker in einfacher und exakter Form in die Auswertung zu integrieren. Darüber hinaus könnte der Einfluss des nachfolgenden Verkehrs in die Beurteilung des Fahrerverhaltens miteinbezogen werden. Da sich eine Abhängigkeit zumindest theoretisch leicht nachvollziehen lässt, wurde das Fahrzeug der ersten Versuchsreihe noch mit einer zusätzlichen Kamera ausgestattet, die die Beobachtung des rückwärtigen Verkehrsraumes erlaubte. Die Auswertung dieser Bilder gestaltete sich jedoch äußerst schwierig, da der schlichte Hinweis auf ein vorhandenes Fahrzeug zu unscharf ist, um modellhaft abgebildet werden zu können. Unverzichtbare Informationen wie der Abstand oder die Relativgeschwindigkeit fehlten. Eine Klassifizierung der Abstände anhand der Videobilder bedeutete einen Aufwand, der in keinem Verhältnis zum Nutzen stand.

Neben dem rückwärtigen Verkehr sind auch die Ablenkung des Fahrers und seine Nebentätigkeiten von Bedeutung, die sich direkt auf das beobachtbare Verhalten auswirken. Daher wurden zunächst noch zwei weitere Kameras installiert, die auf das Armaturenbrett inklusive Lenkrad und den Kopf des Fahrers mit seinem Blickverhalten gerichtet waren. Ihre Auswertung musste angesichts des großen Zeitaufwandes unterbleiben, so dass sich die zweite Versuchsreihe von vorneherein auf die Ausstattung mit einer einzigen Kamera für den vorausliegenden Verkehrsraum beschränkte. Damit blieb die ein oder andere Erklärung für Abweichungen im Verhalten verborgen.

## 5.2 Relevanz der Fahrermodelle

### 5.2.1 Güte der Modellergebnisse

In Kap. 4 ließen sich die Fahrermodelle bereits anhand von statistischen Größen bewerten. Das Bestimmtheitsmaß lieferte den Erklärungsbeitrag der Regressionsfunktion, während die Standardabweichung die verbleibenden durch die Berechnungsvorschrift nicht erkläraren Abweichungen ausdrückte. Vor dem Hintergrund einer Anwendung der Fahrermodelle erscheint jedoch eine differenzierte Betrachtung sinnvoll.

Die streng mathematische Berechnung bezieht sich auf Absolutwerte und entspricht nicht der menschlichen Wahrnehmung, größere Abstände zunehmend ungenauer einschätzen zu können. Da betragsmäßig gleiche Fehler bei kleinen Abständen sicherlich stärker ins Gewicht fallen, erlaubt die relative Abweichung eine anschaulichere Betrachtung der Modellgüte:

$$\text{Abweichung} = \frac{d_{\text{mod}} - d_{\text{mess}}}{d_{\text{mess}}} \cdot 100 \quad (18)$$

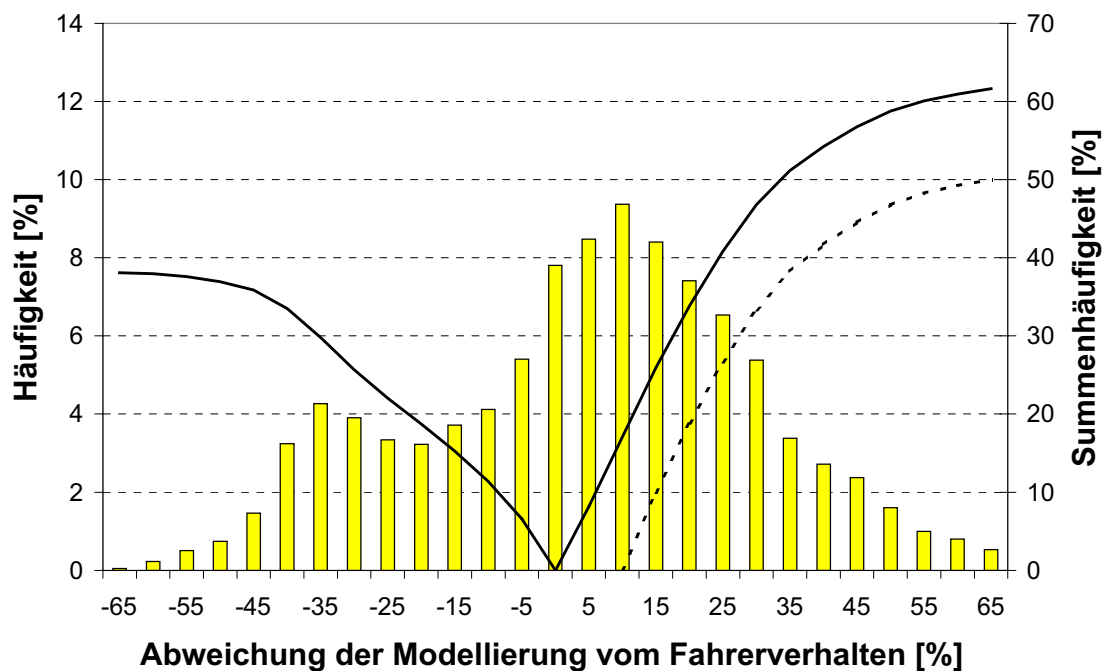
Im Folgenden werden nur die Fahrermodelle näher analysiert, um die Potentiale ihrer Anwendung zu untermauern. Abgesehen davon weist die Modellierung des ACC-Verhaltens ohnehin eine deutlich bessere Genauigkeit auf.

#### 5.2.1.1 Folgefahrt

Die Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Fahrerverhalten in **Bild 5.1** weist zwei Maxima auf.

Das lässt den Schluss zu, dass es sich um eine Überlagerung zweier Verteilungen handelt. Auch hier spiegelt sich einmal mehr der Sachverhalt wider, dass sich die Folgefahrten nicht eindeutig bestimmen ließen. Die vermehrten Abweichungen mit einem Maximum bei –35 Prozent stellen modellierte Abstandswerte dar, die weit unter den gemessenen Werten liegen. Dabei kann es sich nur um Fahrabschnitte handeln, in denen zufällig einem weit vorausfahrenden Fahrzeug mit der gleichen Geschwindigkeit gefolgt wurde, ohne dass der Abstand auf dieses Fahrzeug geregelt wurde. Dadurch wird das Gesamtbild der Abstandsmodellierung verzerrt. Ohne diesen Sachverhalt zunächst zu berücksichtigen, ergibt sich ein Zeitanteil von 30 Prozent der Folgefahrten, in denen die realen Verhältnisse maximal

10 Prozent von den modellierten Abständen abweichen. Weitere 50 Prozent weisen maximal einen Fehler von 35 Prozent auf.



**Bild 5.1:** Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeit (korrigierter Verlauf gestrichelt) der Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abstand bei Folgefahrt der Fahrer (Gesamtdauer ca. 9 Stunden bei 24 Fahrern)

Theoretischen Überlegungen folgend könnte man in Bild 5.1 einen symmetrischen Verlauf der Summenhäufigkeit von positiven und negativen Abweichungen erwarten, wenn man die unterschiedlichen Wahrnehmungsschwellen bei ab- und zunehmenden Abständen vernachlässigt. Setzt man weiter voraus, dass die positiven Abweichungen annähernd nur relevante Folgefahrten beinhalten, obwohl sie angesichts von Drängeln und Antizipation tatsächlich sogar überrepräsentiert sein dürften, dann ließe sich die maximale Häufigkeit bei 10% Abweichung als neuer Mittelwert der Verteilung mit 0% Abweichung ansetzen. Davon ausgehend kann eine Summenhäufigkeit berechnet werden (Bild 5.1: gestrichelter Verlauf), die aufgrund der Symmetrie auch auf die negativen Abweichungen übertragen werden könnte. Damit ließe sich abschätzen, dass auf einen maximalen Fehler von 10 Prozent bereits 40 Prozent der Folgefahrten entfallen. Für die weiteren 40 Prozent der im vorangehenden Absatz genannten Vergleichsbasis reduziert sich der Fehler von 35 auf 25 Prozent.

Abgesehen von dieser unter den genannten Voraussetzungen getätigten Abschätzung lässt sich dem Problem leider nicht näher kommen, da die Veranlassung des Fahrers zur Wahl seines Abstandes nicht zugänglich ist. Wenn man die zufälligen Folgefahrten jedoch identifizieren und ausschließen könnte, ließe sich auch die mathematische Modellierung besser den realen Verhältnissen anpassen. Die Ergebnisse würden nicht nur genauer, die modellierten Abstände

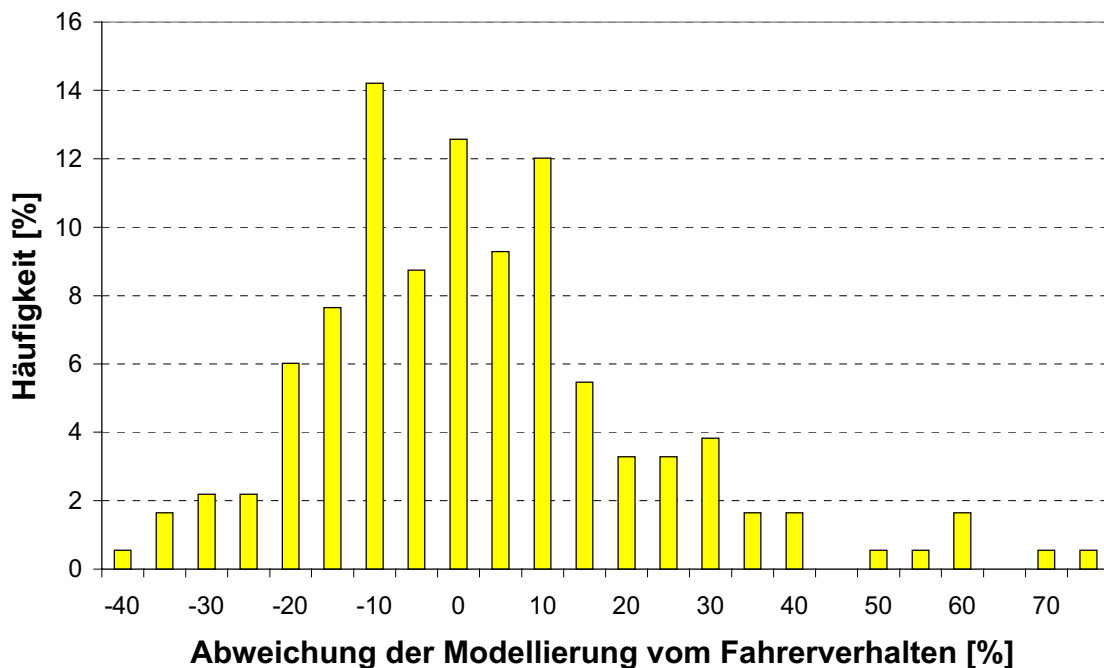


würden sich zu niedrigeren Werten und weiter in den gesetzeswidrigen Bereich verschieben, als es Bild 4.6 (S. 53) wiederzugeben vermag.

### 5.2.1.2 Einscheren

#### Verzögerungsbeginn

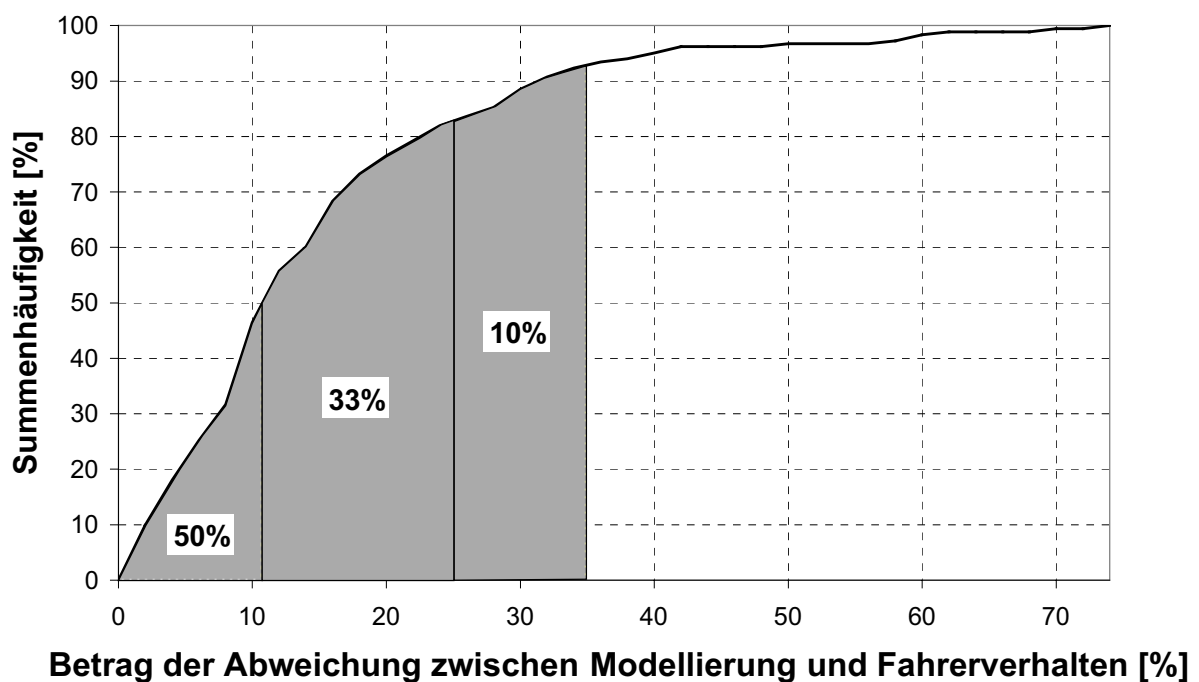
Die auf die Anzahl der ausgewerteten Einschersituationen bezogenen Häufigkeiten der Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Werten weisen in **Bild 5.2** eine asymmetrische Verteilung auf.



**Bild 5.2:** Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Verzögerungsbeginn in Einschersituationen für den Fahrer (N=183)

Es fallen Ausreißer im Bereich von großen positiven Abweichungen ab etwa 30% auf, die für zu große modellierte Abstände bei Verzögerungsbeginn stehen. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass der Fahrer sich vergleichsweise weit hat auflaufen lassen und die Verzögerung entsprechend spät eingeleitet hat. Dieser Sachverhalt mag um so mehr verwundern, da kleinere Abstände mit einem größeren Risiko verbunden sind. Aus der Notwendigkeit des Abbremsens bietet sich dem Fahrer eigentlich weniger Handlungsspielraum, als das bei frühzeitiger Reaktion der Fall wäre. Dieses Verhalten dürfte kaum zufälliger Natur sein und könnte daher auf Unaufmerksamkeit, bewusstes Drängeln oder aber auch die falsche Einschätzung eines potentiellen Ausscherens zurückzuführen sein. Unabhängig davon haben die aufgeführten Fälle keine Bedeutung im Hinblick auf die Abstimmung eines ACC, so dass sie eigentlich zu vernachlässigen sind.

Eine umfassende Beurteilung der Genauigkeit des Modells kann anhand der Summenhäufigkeit in **Bild 5.3** erfolgen. An beispielhaften Eckpunkten lässt sich ablesen, dass bei der Hälfte der zugrunde gelegten Situationen der berechnete Verzögerungsbeginn maximal um 11 Prozent abweicht und ein weiteres Drittel Fehler bis zu 25 Prozent aufweist. Vernachlässigt man die zuvor erwähnten Fälle, die auf Unaufmerksamkeit, Drängeln und falscher Antizipation beruhen, so verbleibt gut ein Zehntel der Situationen mit einem maximalen Fehler von etwa 35 Prozent.

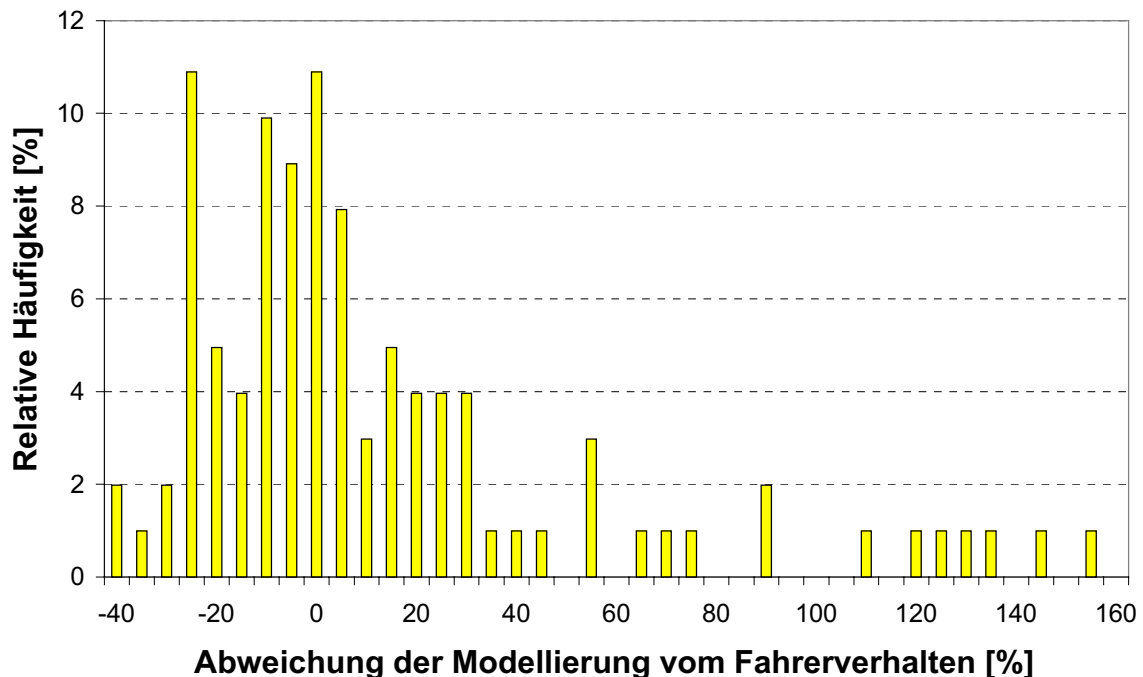


**Bild 5.3:** Summenhäufigkeit der betragsmäßigen Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Verzögerungsbeginn in Einschersituationen für den Fahrer (N=183)

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die freien Parameter in diesem Fall nicht analytisch berechnet werden konnten. Die komplizierte nicht-lineare Struktur der Regressionsfunktion ließ nur eine computergestützte Optimierung zu, die theoretisch unendlich weit getrieben werden kann. Daher ist nicht sichergestellt, dass auch das globale Minimum der Optimierungsfunktion gefunden wurde. Es kann jedoch üblicherweise abgebrochen werden, wenn wie im vorliegenden Fall eine hinreichende Genauigkeit erzielt wird. Als Fazit lässt sich feststellen, dass sich der Verzögerungsbeginn angesichts der bislang unberücksichtigten fahrertypischen Charakteristik allein anhand der situativen Größen Einscheraabstand, Relativgeschwindigkeit und Geschwindigkeit gut erklären lässt.

### Minimalabstand

In **Bild 5.4** sind die prozentualen Abweichungen der modellierten Minimalabstände von den gemessenen Werten dargestellt.

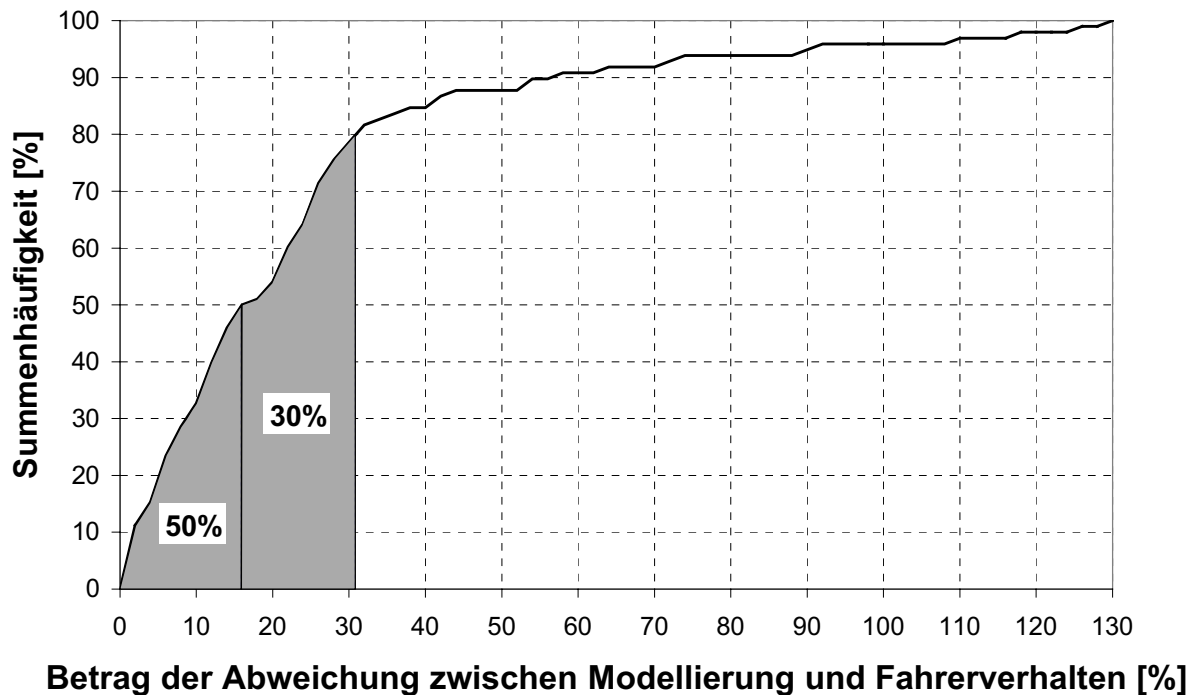


**Bild 5.4:** Häufigkeitsverteilung der Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Minimalabstand in Einschersituationen für den Fahrer (N=101)

Die Häufigkeitsverteilung ist unsymmetrisch. Während der negative Fehler maximal 40 Prozent beträgt, zeigen sich im positiven Bereich einige Ausreißer bis zu 155 Prozent. Positive Fehler bedeuten, dass die Fahrer kleinere Abstände eingestellt haben, als sich aus der Berechnung ergeben. Da es sich um Einzelfälle mit vergleichsweise großen Werten außerhalb der ansonsten tendenziell normal verteilten Abweichungen handelt, ist die Ursache nicht unbedingt in den individuellen Unterschieden der Fahrer zu vermuten. Dafür spricht auch, dass die großen Abweichungen vorzugsweise bei hohen Relativgeschwindigkeiten auftreten. Eine Erklärung könnten die bereits mehrfach angesprochenen persönlichen Motive der Fahrer sein. Der Einscherende zwingt den Fahrer, seine Geschwindigkeit zu reduzieren. Bei hohen Relativgeschwindigkeiten ist die Wahrscheinlichkeit für den Unmut des Fahrers am größten, so dass er in dem Wunsch, möglichst bald zu überholen, die Abstände verkürzt. Hier bestätigen sich die in Kap. 4.2.2.2 angeführten Zusammenhänge von Motiven und Fahrerverhalten. Dabei wird deutlich, mit welchen Einschränkungen solche Situationen im Vorfeld nur aussortiert werden konnten.

Die Genauigkeit der Modellierung lässt sich anschaulicher anhand der Summenhäufigkeit in **Bild 5.5** beurteilen. In 50 Prozent der Situationen weicht der modellierte Minimalabstand

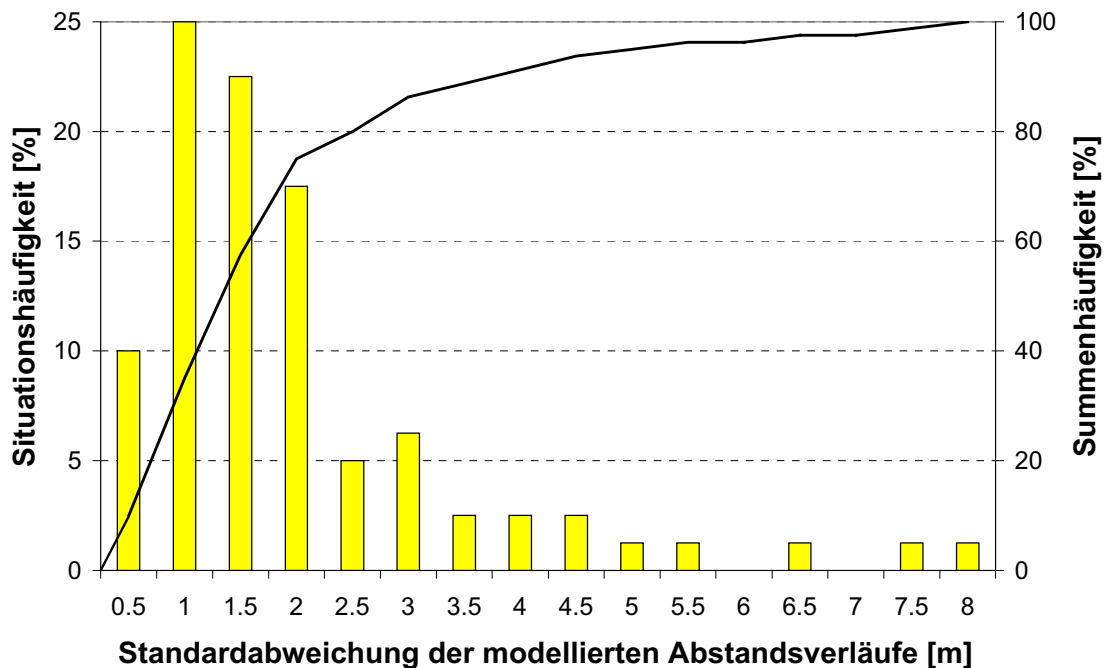
weniger als 16 Prozent vom gemessenen Wert ab. Weitere 30 Prozent der Situationen liegen bis zu 31 Prozent daneben. Die verbleibenden 20 Prozent der Situationen setzen sich überwiegend aus den beschriebenen Fällen zusammen, in denen fahrerspezifische Motive ein untypisches Verhalten bewirken, das nicht Gegenstand der Modellierung sein soll. Angesichts der Streuungen, die sich schon allein aus der Individualität der Fahrer ergeben müssen, liegt eine ansprechende Modellgüte vor.



**Bild 5.5:** Summenhäufigkeit der betragsmäßigen Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Minimalabstand in Einschersituationen für den Fahrer (N=101)

#### Abstandsverlauf

Im Fall des Abstandsverlaufes handelt es sich um die Modellierung einer zeitabhängigen Größe. Die unterschiedliche zeitliche Ausdehnung der Situationen bemisst ihren Abweichungen unterschiedliche Bedeutungen zu, so dass hier eine Betrachtungsweise analog zu Verzögerungsbeginn und Minimalabstand unzweckmäßig erscheint. Nicht nur die Abweichungen selbst, sondern auch die Charakteristik des Verlaufs spielt bei der Beurteilung der Modellgüte eine Rolle. Daher wurde für jede Einschersituation eine eigene Standardabweichung des modellierten Abstandsverlaufes berechnet, deren Häufigkeitsverteilung sich aus **Bild 5.6** ergibt. Auf der Abszisse sind die Maximalwerte der in Klassen eingeteilten Standardabweichungen aufgetragen. In 75 Prozent der Einschersituationen liegt die Standardabweichung unter einem Wert von 2 Metern.

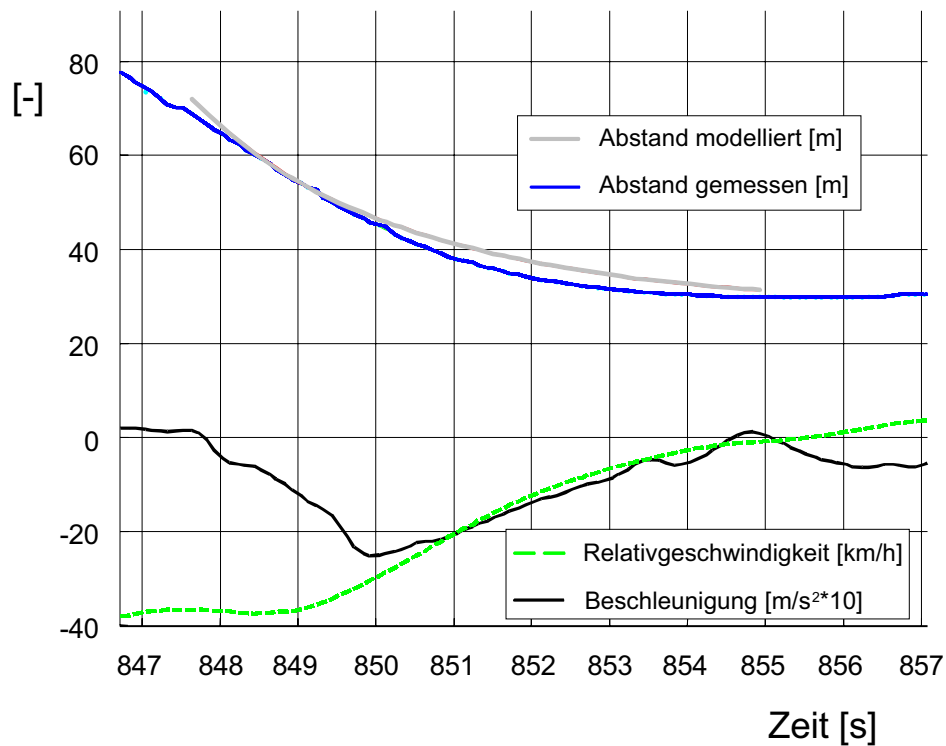


**Bild 5.6:** Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen zwischen modellierten und gemessenen Abstandsverläufen für den Fahrer (N=80)

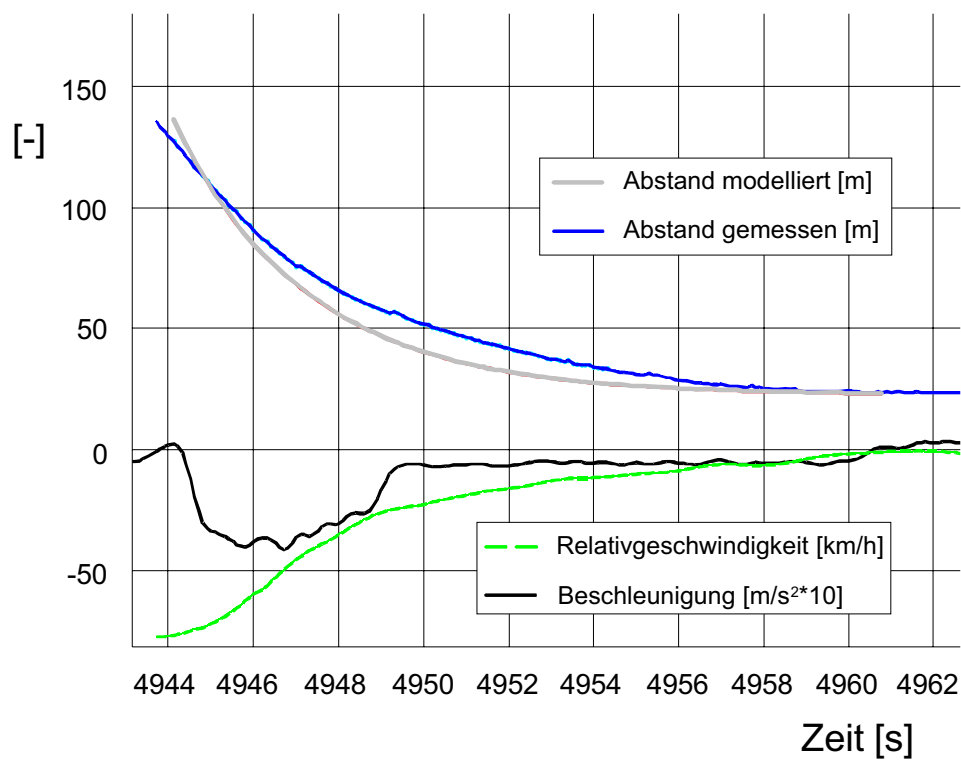
Um die Größenordnung zu veranschaulichen, werden die Abweichungen an zwei Beispielen verdeutlicht.

In **Bild 5.7** werden gemessener und modellierter Abstandsverlauf miteinander verglichen. Das Beispiel repräsentiert mit einer Standardabweichung von 2,3 Metern den negativen Grenzfall von 75 Prozent der Situationen. Der absolute Fehler beträgt maximal etwa 3 Meter, was auch noch als sehr gering bezeichnet werden kann.

**Bild 5.8** zeigt den Fahrereinfluss auf die Modellgüte anhand eines modellierten Abstandsverlaufes, dessen Standardabweichung von 7,1 Metern fast den schlechtesten Wert markiert. Der Fahrer bremst bereits früh sehr stark, so dass der Verlauf der Verzögerung nicht mehr die meist übliche und für die Modellierung auch angenommene Symmetrie aufweist. Der Abstand verläuft entsprechend flacher und weicht zwischenzeitlich bis zu etwa 10 Metern vom modellierten Verlauf ab. Das entspricht einem maximalen relativen Fehler von gut 20 Prozent. Dieses Beispiel zeigt die Grenzen der Individualisierbarkeit des Modellansatzes auf. Die Abweichung liegt dennoch in einem vertretbaren Ausmaß, das angesichts der eingeschränkten Fähigkeit zur Wahrnehmung von Abständen durchaus noch mit der Akzeptanz des Fahrers rechnen lässt.



**Bild 5.7:** Modellierter Abstandsverlauf für ein Situationsbeispiel mit einer Standardabweichung von 2,3 Metern



**Bild 5.8:** Modellierter Abstandsverlauf für ein Situationsbeispiel mit einer Standardabweichung von 7,1 Metern

### 5.2.2 Einschränkungen der Gültigkeit

Ein Modell weist naturgemäß Einschränkungen auf, da es reale Zustände und Vorgänge nur unvollkommen abbilden kann. Abgesehen von den mathematischen Möglichkeiten, ein beobachtetes Verhalten nur bedingt beschreiben zu können, finden auch die kausalen Zusammenhänge keine vollständige Beachtung. Aus der notwendigen Vereinfachung der Verhältnisse ergeben sich Abweichungen zwischen Modell- und Messergebnissen, die im vorangehenden Kapitel diskutiert wurden. Nun gilt es, auch auf deren Ursachen näher einzugehen.

Aus verschiedenen Gründen konnten nicht alle Einflussgrößen in das Modell miteinbezogen werden, die zumindest vom theoretischen Standpunkt aus hätten berücksichtigt werden müssen. Manche Einflüsse entzogen sich einer näheren Untersuchung, da ihre Erfassung nicht hinreichend gewährleistet war. In diesem Zusammenhang sind insbesondere die Eigenschaften der Fahrer zu nennen. Interindividuelle Unterschiede fanden in der Verwendung eines gemischten Kollektivs noch ansatzweise Berücksichtigung. Die repräsentative Altersverteilung und ausgewogene Zusammensetzung nach Fahr- und Tempomaterfahrung sollten eine möglichst gute Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleisten. Dennoch steht die Frage im Raum, inwieweit die zugrundegelegten Merkmale die Auswahl einer Stichprobe rechtfertigen. Die Kriterien mögen für sich betrachtet noch sinnvoll erscheinen, doch bleiben weitere Unterschiede zwischen den Fahrern wie beispielsweise hinsichtlich Sehvermögen, Reaktionsschnelligkeit, Fahrgewohnheiten etc. unberücksichtigt, obwohl sie das Verhalten zweifelsohne mitbestimmen. Demzufolge lässt sich das ermittelte durchschnittliche Verhalten nicht uneingeschränkt auf eine größere Gruppe von Fahrern übertragen.

Auch intraindividuelle Schwankungen, denen jeder Fahrer im Laufe der Zeit unterworfen ist, müssten differenzierter betrachtet werden. Veränderungen der körperlichen und emotionalen Zustände führen zu unterschiedlichen Ausprägungen menschlichen Handelns. Eigenschaften wie Müdigkeit, Konzentrationsfähigkeit, Aufmerksamkeit etc. sind jedoch ebenfalls nur schwer zugänglich.

Abgesehen von der Tatsache, dass die Auswahl eines Fahrerkollektivs kein vollständiges Abbild aller bestimmenden Größen liefern kann, setzten sich die Untersuchungen ohnehin nicht zum Ziel, unterschiedliche Verhaltensweisen fahrerspezifisch erklären zu wollen. Es sollte vielmehr ein „Normalverhalten“ modelliert werden, das der Gestaltung von Abstandsregelungssystemen nützlich sein kann. Daher gelten alle Aussagen nur für einen durchschnittlichen Fahrer im Sinne des Kollektivs. Zusammenhänge zwischen individuellen Eigenschaften und Verhaltensformen nehmen dagegen in [1] eine zentrale Stellung ein.

Trotzdem zeigte sich im Laufe der Untersuchungen die Notwendigkeit, zumindest die Intentionen und Motive menschlichen Handelns näher zu beleuchten, soweit sie sich aus dem beobachtbaren Verhalten ableiten ließen. So konnte in einigen Fällen eine Verkürzung der Abstände zum Vordermann beobachtet werden, die darauf ausgerichtet war, die eigene Fahrt möglichst ungehindert fortsetzen zu können. Diese Vorgänge, zu denen das Drängeln ebenso

zählt wie die Vorwegnahme von eigenen Spurwechseln und antizipierten Ein- und Ausschermanövern vorausfahrender Verkehrsteilnehmer, sind von besonderer Bedeutung, da sie keine Grundlage zur Abstimmung eines Abstandsregelungssystems sein dürfen. Ein derart agierendes Verhalten kann ein technisches System, das angesichts seiner eingeschränkten Situationserkennung und –interpretation auf Reaktionen beschränkt bleiben muss, nicht erbringen. Soweit sich die beschriebenen Verhaltensweisen anhand von Abstands-, Geschwindigkeits- und Drosselklappenverläufen identifizieren ließen, wurden die entsprechenden Situationen aussortiert. Dieser Vorgehensweise waren jedoch Grenzen gesetzt, da eine Vorauswahl ausschließlich bei eindeutigen Handlungen erfolgen durfte, und somit nur in außergewöhnlichen Fällen auf die Absichten des Fahrers geschlossen werden konnte. Längerfristige Behinderungen in der Geschwindigkeitswahl wirken sich beispielsweise auf die Motivation wie Eile und akzeptiertes Sicherheitsniveau aus, ohne zu explizit erkennbaren Reaktionen führen zu müssen. Demzufolge spielt auch die Historie eine wichtige Rolle bei der Beurteilung des Fahrerverhaltens. Dies einzubeziehen, bedeutet einen Mehraufwand, den die Situationsklassifikation nicht leisten kann, so dass die Fahrermodelle solche Einflüsse nicht abbilden.

Angesichts der Diskussion von Verhaltensursachen verdienen auch etwaige Störeinflüsse Beachtung, die die Frage aufwerfen, inwieweit das modellierte Verhalten als realitätsnah eingeschätzt werden kann. Die Fahrer kannten zwar nicht die Zielsetzung der Untersuchungen, doch trotz der Absicht, Rückwirkungen jeglicher Art weitestgehend zu vermeiden, fanden die Fahrten letztendlich unter einem ungewohnten Fahrtzweck statt. So könnte die Anwesenheit des Versuchsbegleiters ein gemäßigteres Verhalten bewirkt haben, als unbeobachtet an den Tag gelegt worden wäre. Alltagsbedingte Eile dürfte unter diesem Aspekt eine untergeordnete Rolle gespielt haben. Dagegen hatte die Tatsache, ein neu entwickeltes System zu testen, zumindest in der ersten Versuchsreihe keine Auswirkung auf die Aktivierung der Fahrer. Die Aufgabe bestand lediglich im Abfahren einer vorgegebenen Strecke ohne sonstige außergewöhnliche Bedingungen.

Die Modelle beziehen keine optischen Signale mit ein, da die Qualität der Bildaufzeichnung keine Auswertung bis zur Sichtweite des Fahrers zuließ. Im Gegensatz zum Bremslicht wurden die Blinksignale noch begrenzt analysiert, hatten jedoch ein stark indifferentes Verhalten zur Folge. Der Einfluss von Fahrzeugen vor dem Vorausfahrenden konnte nicht berücksichtigt werden, denn sowohl Radar als auch Kamera stellten die benötigten Informationen aufgrund der Verdeckungen lediglich lückenhaft zur Verfügung. Auswirkungen durch hinterherfahrende Fahrzeuge sind ebenfalls denkbar, können jedoch nur modelliert werden, wenn auch der Abstand und die Relativgeschwindigkeit verfügbar sind. In diesem Fall verdient das Blickverhalten des Fahrers gesonderte Beachtung, wann und wie häufig er sich im Spiegel über den rückwärtigen Verkehr informiert.

Einige Einflüsse mussten ausgeklammert werden, um sich zunächst auf das Wesentliche zu konzentrieren und den Umfang der Untersuchungen nicht ausufern zu lassen. Daher gelten die



aufgestellten Modelle nur für Trockenheit, obwohl Witterung, Sichtbedingungen und Reibverhältnisse das Abstandsverhalten ebenfalls beeinflussen [36]. Eine Ausweitung wird im Rahmen von SANTOS (Situations-angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung) innerhalb des vom BMBF aufgelegten Forschungsrahmenprogramms „Sichere Straße“ angestrebt [65].

Hinsichtlich der örtlichen Gültigkeit bleiben die Modelle zunächst allein auf Deutschland beschränkt. Straßen- und Verkehrsverhältnisse, Verkehrsregeln, Mentalitäten und Tempomatnutzung sind nur einige Faktoren, die es hinsichtlich der Übertragbarkeit zu prüfen gelte. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich neben ihrer Zusammensetzung auch die Situationen selbst in anderen Ländern stark unterscheiden. Die Methodik könnte in gleicher Weise angewendet werden, müßte jedoch eine Anpassung an die dortigen Verhältnisse erfahren.

### 5.2.3 Anwendung der Fahrermodelle

Heutige Fahrerassistenzsysteme werden noch überwiegend anhand von Prototypen mit realen Fahrern untersucht, jedoch verlangt die zunehmende Verlagerung der Entwicklung in den Rechner auch genauere Fahrermodelle. Ein Einsatzgebiet ist daher die zeit- und kostensparende Generierung von Sollgrößen für die Entwicklung von Abstandsregelungssystemen. Je besser solche Systeme an den Fahrer angepasst sind, desto höher sind die zu erwartende Akzeptanz und die Sicherheit.

In diesem Fall erscheint es sicher nicht angeraten, die Modelle menschlichen Verhaltens eins zu eins auf ein technisches System zu übertragen. Zum einen müssen sie unter dem Sicherheitsaspekt kritisch geprüft werden, da das Fahrerverhalten positiv beeinflusst werden soll. Zum anderen ist zu befürchten, dass ein Fahrer seine eigene Fahrweise nicht akzeptiert, wenn er sie passiv erlebt. Auch wenn hier noch weitere Kenntnisse wünschenswert sind, erleichtern die vorliegenden Modelle bereits die Anpassung des Verhaltens. Sie wurden dahingehend optimiert, dass sie das durchschnittliche Verhalten der Fahrer mit möglichst geringer Abweichung wiedergeben. Eine Verwendung als Vorgabe eines einzuregelnden Sollverhaltens ließe sich darauf aufbauen. Dabei ist es von Nutzen, dass die Modelle durchgängig auf verfügbaren Größen aufbauen. Die geschlossene Modellierung des Verzögerungsverhaltens in Einschersituationen ist beispielsweise nur möglich, da sich der Minimalabstand bereits bei Verzögerungsbeginn bestimmen und somit vorhersagen lässt. Die aufgezeigten theoretischen Potentiale stellen jedoch auch hohe Anforderungen an die Sensorik. Solange diese nicht erfüllt werden können, bleibt eine praktische Umsetzung und Erprobung noch undurchführbar.

Der nächste Schritt ist die Einbindung von psychologischen und physiologischen Größen der Fahrer, da das menschliche Verhalten in den seltensten Fällen eindeutig ist. Die durchgeführten Untersuchungen haben Potentiale dazu erkennen lassen. Sogenannte fahreradaptive Modelle stellen eine Herausforderung dar, die Zufriedenheit des Fahrers weiter zu verbessern.

Ein weiteres Gebiet zum Einsatz der Fahrermodelle ist die Verkehrssimulation, die im Zuge der Zunahme und baulichen Grenzen von Verkehr an Bedeutung gewinnt. Neben der Behandlung des Verkehrs als Kontinuum in Analogie zu physikalischen Gesetzen bedient man sich auch der Simulation einzelner Fahrzeuge, um das Verhalten ganzer Fahrzeugkolonnen nachzubilden. Die Verwendung solch mikroskopischer Modelle stellt zwar höhere Anforderungen an die Rechenkapazität, verspricht aber auch eine genauere Abbildung. Rasante Fortschritte im Bereich der Computertechnik eröffnen hier neue Spielräume.

Schließlich bleibt als Anwendungsgebiet der Fahrsimulator zu nennen, der ein realistisches Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer voraussetzt. Derzeit noch überwiegend in Forschung und Entwicklung eingesetzt, werden Fahrsimulatoren angesichts der Entwicklung von leistungsfähigen Grafikrechnern jedoch auch für die Fahrerausbildung zunehmend interessanter.

### 5.3 Betrachtungen zur Sicherheit

Wie in Kap. 2.2.4 bereits ausgeführt wurde, stellt die Sicherheit keine direkt messbare Größe dar. Stattdessen muss Sicherheit anhand von Indikatoren beurteilt werden, deren Auswahl sich nach keinem einheitlichen Schema richten kann. Hier ergeben sich zwangsläufig Freiheiten, die sich direkt auf die zu treffenden Aussagen auswirken und diese mehr oder weniger in Frage stellen können. Daher verdient die Vorgehensweise zur Beurteilung der Sicherheit eine gesonderte Beachtung, inwieweit die Kriterien Objektivität, Reliabilität und Validität überhaupt erfüllt sind.

Sicherheit beruht häufig auf subjektiven Empfindungen, die individuell sehr unterschiedlich ausgeprägt sind. Deshalb wurden mit der Zeitlücke und dem Time-to-collision zwei Kenngrößen ausgewählt, deren objektive Erfassung sichergestellt ist. Hinsichtlich der Reliabilität ist neben der zuverlässigen Messung von Abständen und Geschwindigkeit, die als gegeben betrachtet werden kann, auch die Reproduzierbarkeit von Bedeutung. Zeitlücke und Time-to-collision ergeben sich nicht nur aus der Absicht und dem Verhalten von Fahrer bzw. ACC, sondern unterliegen auch den Einflüssen der anderen Verkehrsteilnehmer. Die zeitliche Veränderlichkeit des Verkehrs bringt damit eine zufällige Komponente ins Spiel, die nur über eine ausreichend große Stichprobe in den Griff zu bekommen ist. Fahrtzeiten über alle Versuchsteilnehmer von jeweils 60 Stunden mit und ohne ACC lassen erwarten, dass diese Voraussetzung erfüllt ist.

Damit bleibt die wichtige Frage der Validität zu klären, inwieweit die Beschreibung der Sicherheit überhaupt Gültigkeit hat. Dabei spielt zunächst eine Rolle, ob die Kombination von Zeitlücke und Time-to-collision ein hinreichendes Maß zur Beurteilung von Sicherheit darstellt. Darüber hinaus ist auch von Bedeutung, ob die vorliegenden Untersuchungen den Anwendungsfall von ACC tatsächlich abdecken können.

Zeitlücke und Time-to-collision werden dahingehend verwendet, dass sie momentane Zustände charakterisieren. Die Beschreibung der Sicherheit beschränkt sich damit auf die tatsächlich

beobachtbaren Verhältnisse. Spekulationen über den Fortgang der Ereignisse bleiben bewusst außen vor, da sie sich nicht scharf umreißen lassen und einer objektiven Betrachtung des Istzustandes entgegenstehen. Dennoch lässt sich zeigen, welche Bedeutung sie für das aktuelle Sicherheitsniveau haben.

Die Zusammenhänge seien am folgenden Beispiel erläutert, wofür zwei verschiedene Ausgangssituationen angenommen werden:

Situation 1: Ein vorausfahrendes Fahrzeug hat eine Geschwindigkeit von 72 km/h. Diesem nähert sich ein zweites Fahrzeug mit 90 km/h in einem Abstand von 20 Metern an.

Situation 2: Das vorausfahrende Fahrzeug hat nun eine Geschwindigkeit von 144 km/h. Diesmal nähert sich ihm ein Fahrzeug mit 180 km/h in einem Abstand von 40 Metern an.

Beide Situationen weisen bewusst identische Werte für Zeitlücke ( $t_z=0,8$  s) und Time-to-collision ( $t_{tc}=4$  s) auf. Hierbei handelt es sich um durchaus übliche Verkehrsverhältnisse, wie sich anhand von Bild 4.26 nachvollziehen lässt.

Im Folgenden sollen die Situationen für jeweils zwei unterschiedliche Fälle der weiteren Entwicklung betrachtet werden. Die entsprechenden Berechnungsformeln sind im Anhang aufgeführt.

Fall A: Es sei angenommen, dass das vorausfahrende Fahrzeug seine Geschwindigkeit nicht ändert. Setzt man für das sich annähernde Fahrzeug eine maximale Verzögerung von  $10 \text{ m/s}^2$  an, dann ist die Geschwindigkeit in Situation 1 bei einem Abstand von 18,75 m gegenüber 35 m in Situation 2 angeglichen. Situation 2 bietet in diesem Fall die größere Sicherheitsreserve.

Fall B: In diesem Fall bremsen beide Fahrzeuge zeitgleich mit der maximalen Verzögerung von  $10 \text{ m/s}^2$  bis zum Stillstand ab. In Situation 1 kommt der Nachfolgende 8,75 m hinter dem vorausfahrenden Fahrzeug zum Stehen. In Situation 2 dagegen würde das nachfolgende Fahrzeug 5 m mehr Weg bis zum Stillstand benötigen, als ihm an Abstand zur Verfügung steht. Die Aufprallgeschwindigkeit würde 36 km/h betragen. Die Verhältnisse kehren sich um und Situation 2 birgt plötzlich das größere Risikopotential.

Setzt man eine Reaktionszeit für den nachfolgenden Fahrer an, würden sich die Verhältnisse noch verschlimmern. Darüber hinaus lassen die Abhängigkeiten der menschlichen Wahrnehmungsschwellen für Relativgeschwindigkeiten (Kap. 2.2.1, Glg. 2, S. 8) vermuten, dass die Reaktionszeit in Situation 2 größer ist als in Situation 1. Ohne die Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen wie z.B. aufleuchtender Bremsleuchten ist der Reiz in Situation 2 nur halb so groß wie in Situation 1.

All dies „Was wäre, wenn...“ verdeutlicht die Schwierigkeit, Sicherheit objektiv und eindeutig zu bemessen. Hypothesen über den Fortgang der Ereignisse wirken sich auf die Bewertung des aktuellen Sicherheitsstatus aus. Zwangsläufig stehen Fragen im Raum, welches theoretische Verzögerungspotential einem Fahrzeug zuzuordnen ist, welche Verzögerungen bei gegebenen Straßenverhältnissen möglich sind und welche Verzögerung ein Fahrer denn tatsächlich

realisiert. Die Realität bewegt sich sicherlich zwischen den Grenzen, die die betrachteten Fälle A und B repräsentieren. Um solchen Spekulationen zunächst aus dem Wege zu gehen, beschränkten sich die Bewertungen auf die tatsächlich beobachtbaren Verhältnisse in Form von Zeitlücke und Time-to-collision. Die Zeitlücke stellt zudem eine gängige Größe dar, die auch in der Rechtsprechung zugrundegelegt wird.

Doch wie sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse im vorliegenden Fall der Untersuchungen zu interpretieren? Da die Fahrten mit und ohne ACC fast die identischen Geschwindigkeitsprofile aufweisen, lässt die hohe Anzahl an Situationen vermuten, dass sich die im obigen Beispiel erläuterten Unterschiede angesichts ihres zufälligen Charakters gleichermaßen auf Fahrten mit und ohne ACC verteilen. Die relative Bewertung der Sicherheit auf der Basis eines Vergleichs dieser Fahrten erscheint daher gerechtfertigt.

Neben dem Vergleich von Fahrer und ACC ist es jedoch auch von Interesse, die Beziehung der situationsbezogenen Sicherheitskenngrößen zum Unfallkriterium zu klären [3]. Unter diesem Gesichtspunkt kann eine absolute Betrachtung der Sicherheit ausschließlich anhand von Zeitlücke und Time-to-collision nicht als hinreichend bezeichnet werden. Gleiche Werte bei höheren Relativgeschwindigkeiten sind als kritischer anzusehen, da überproportional mehr Weg zum Abbau der Relativgeschwindigkeit und Stabilisieren der Situation benötigt wird. Diese Erkenntnis ist nicht neu, weist jedoch auf eine grundsätzliche Problematik heutigen Straßenverkehrs hin. Im Normalfall liegen auf Autobahnen relativ gleichmäßige Geschwindigkeiten vor, die durch niedrige Verzögerungen gekennzeichnet sind. Damit besteht die Gefahr, dass die Fahrer ihre Abstände an diese üblichen Verhältnisse (*Fall A*) adaptieren. Sie kalkulieren mit Sicherheitsreserven, die bei Störungen des Verkehrsablaufes, die das vorausfahrende Fahrzeug zum Bremsen zwingen (*Fall B*), plötzlich nicht mehr ausreichen. Ist ein Ausweichen dann nicht mehr möglich, kommt es unweigerlich zum Auffahrunfall. Problematisch erscheinen diese Zusammenhänge insbesondere in Verbindung mit dem beobachteten Verhalten, Abstände bewusst zu verkürzen, um Fahrzeuge am Einscheren zu hindern oder sie zum Ausscheren zu bewegen, um die eigene Geschwindigkeit möglichst beibehalten zu können.

Abschließend bleibt zu diskutieren, inwieweit die Untersuchungen den Anwendungsfall von ACC tatsächlich abdecken. Alle Versuchsfahrer fuhren zum ersten Mal mit ACC, was sich theoretisch in unterschiedlichster Art und Weise auf das Verhalten auswirken kann. Einerseits kann die Unerfahrenheit mit dem System zu vergleichsweise kritischen Momenten geführt haben. Auf der anderen Seite dürfte die Neuartigkeit des Systems in einer gewissen Neugierde resultiert sein und die Aufmerksamkeit gesteigert haben bis hin zu einer Art Forschungs- oder Spieltrieb, die Grenzen des Systems auszutesten. Mit dieser Kennenlernphase sieht sich jedoch zwangsläufig auch jeder zukünftige Kunde konfrontiert, so dass die Untersuchung dieser Gegebenheiten ohne Zweifel von Bedeutung ist.

Trotz aller ableitbaren und theoretisch auch realisierbaren Anpassungen an den Fahrer wird deutlich, dass viele Änderungen nur mit verbesserter Sensorik und sichererem

Situationsbewusstsein möglich werden. Damit ließen sich auch technisch bedingte Tot- und Schwellzeiten, wie sie beispielsweise beim Bremsen auftreten, kompensieren.

Dabei steht nach wie vor die Frage im Raum, wie weit man die Anpassung an den Fahrer treiben darf. Wieviel Entlastung ist sinnvoll, ohne den Fahrer zu unterfordern oder ihm ein ungerechtfertigtes Vertrauen in die Systemleistungen zu suggerieren? Die Nutzung von ACC führt langfristig zwangsläufig zu Anpassungen im Verhalten des Fahrers, wofür die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsfahrten als zu kurz bezeichnet werden müssen. Diesbezüglich erscheinen Langzeituntersuchungen dringend angeraten, die eine gute Gewöhnung des Fahrers an den Umgang mit ACC gewährleisten. Sie müssen auch Teach-back-Effekte und das reale Nutzungsverhalten klären, das letztlich das Ausmaß aller Aus- und Nebenwirkungen auf den Verkehr bestimmt.

## 5.4 Fazit

Die methodenbezogene Diskussion zeigt auf, dass der außerordentliche Aufwand der Versuche notwendig war, um die Vielschichtigkeit des von der Individualität der Teilnehmer stark geprägten Verkehrsgeschehens repräsentativ abbilden zu können. Eine detailliertere Variation der Parameter hätte den Mehraufwand wiederum kaum gerechtfertigt.

Ergänzend zu der Bewertung der Modelle anhand statistischer Größen in Kap. 4 wird ein anschaulicher Weg zur Beurteilung der Modellgüte verfolgt, der sich an den Wahrnehmungseigenschaften des Menschen orientiert. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Modelle das Verhalten der Fahrer sehr gut beschreiben, zumal individuelle Unterschiede soweit nicht berücksichtigt wurden. Die Qualität der Modelle erlaubt, sie in der Verkehrssimulation einzusetzen oder das Sollverhalten eines Abstandsregelungssystems genauer abzustimmen.

Hinsichtlich der Beurteilung von Sicherheit zeigt sich die Problematik, maßgeblichen Kriterien wie Objektivität, Reliabilität und Validität gleichermaßen gerecht werden zu können. Neben der Schwierigkeit bei theoretischen Betrachtungen betrifft dies gleichermaßen die tägliche Praxis auf den Straßen. Die Adaption des Verhaltens an übliche Verkehrsabläufe trübt den Blick für potentiell kritische Situationen und führt im Falle einer unerwarteten Störung zu unangepassten Abständen, die die Unfallgefahr drastisch erhöhen.

Abschließend bleibt festzustellen, dass die durchgeführten Untersuchungen die erste Kennenlernphase im Umgang mit ACC repräsentieren. Die Versuchsfahrten waren jedoch zu kurz, um langfristige Verhaltensanpassungen und deren Auswirkungen infolge der Gewöhnung an ACC analysieren zu können.

## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Abstandsverhalten von Pkw auf Autobahnen. Mit der Verfügbarkeit von Abstandsregelungssystemen steht die Frage im Raum, wie sich deren Einsatz auf die Sicherheit im Straßenverkehr auswirkt. Ein Vergleich der Fahrweise mit und ohne Einsatz eines ACC erlaubt die Beurteilung von Sicherheit und Komfort und liefert Hinweise, die Systeme anwendungsgerecht abstimmen zu können.

Die unzureichende Kenntnis des Abstandsverhaltens erforderte einen experimentellen Ansatz, der die objektive Beobachtung repräsentativer Versuchsteilnehmer unter realen Verkehrsbedingungen ermöglichte. Auf der Basis einer Situationsklassifikation, die eine Einteilung nach vergleichbaren Anforderungen vorsah, konnte das Verhalten der Fahrer modelliert und dem ACC gegenübergestellt werden.

Die zeitlich am häufigsten aufgetretene Folgefahrt hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug wies Abstände auf, die sich bei konstanter Verkehrsdichte proportional zur Geschwindigkeit verhielten. Diese sogenannte Zeitlücke nahm mit der Verkehrsdichte ab und führte dazu, dass die Fahrer in 83 Prozent der Fälle die gesetzlich zulässige Grenze unterschritten.

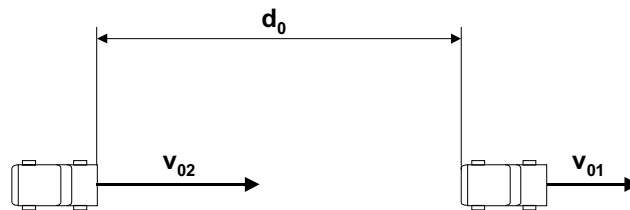
Eine vergleichsweise seltene Situation mit höheren Anforderungen an das Reaktionsverhalten stellte das Einscheren langsamerer Fahrzeuge dar, die zwangsläufig zu einer Verringerung der eigenen Geschwindigkeit führen mussten. Als entscheidende Einflussparameter ließen sich Einscherabstand, Fahrgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsunterschied identifizieren. Während die Fahrer mit zunehmendem Geschwindigkeitsunterschied bei größeren Abständen zu verzögern begannen, wurden die Abstände bei ACC immer kleiner. Dieser Sachverhalt veranlasste die Fahrer, in ACC-geregelten Einschersituationen mit Geschwindigkeitsunterschieden oberhalb von 45 Kilometern pro Stunde ausnahmslos einzugreifen. Der minimale Abstand, bei dem die Geschwindigkeit des eingescherten Fahrzeugs erreicht wurde, nahm sowohl für ACC als auch für den Fahrer ab, je größer der Geschwindigkeitsunterschied und je kleiner der Abstand jeweils bei Beginn der Verzögerung waren. Ein der Folgefahrt vergleichbarer Einfluss der Geschwindigkeit konnte ausgeschlossen werden.

Neben dem direkten Vergleich von ACC und Fahrer wurde der Umgang mit dem System anhand von Zeitlücke und Time-to-collision beurteilt, die als charakteristische Größen die verfügbaren Sicherheitsreserven widerspiegeln. Hinsichtlich der Folgefahrt bestätigte sich ein positiver Einfluss von ACC, da die Zeitanteile kritischer Werte deutlich geringer ausfielen. Die nach den oben genannten Ergebnissen eher als problematisch vermuteten Einschersituationen und Annäherungen führten weder subjektiv noch objektiv zu unfallkritischen Folgen, auch wenn die minimalen Time-to-collision in Verbindung mit der ACC-Nutzung etwas niedriger lagen.

## 7 Anhang

Annäherung zweier Fahrzeuge mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten:

Ausgangssituation:



Geschwindigkeit:

$$v = v_0 + a \cdot t$$

$$\Rightarrow t = \frac{v - v_0}{a}$$

Weg:

$$s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

$$= v_0 \cdot \frac{v - v_0}{a} + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left( \frac{v - v_0}{a} \right)^2$$

Abstand:

$$d = d_0 + s_1 - s_2$$

Fall A:  $a_1 = 0$ ;  $v_2 = v_1 = v_{01}$

$$d = d_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{(v_{01} - v_{02})^2}{a_2}$$

Fall B:  $a_1 \neq 0$ ;  $v_1 = v_2 = 0$

$$d = d_0 - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{01}^2}{a_1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{02}^2}{a_2}$$

## 8 Literatur

- [1] Abendroth, B.: Gestaltungspotentiale für ein Pkw-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen. Dissertation TU Darmstadt, Fachgebiet Arbeitswissenschaft, Darmstadt, 2001, in Vorbereitung
- [2] Allen, R.W.; Magdaleno, R.E.; Serafin, C.; Eckert, S.: Driving Car Following Behaviour Under Test Track and Open Road Driving Condition. SAE Paper 970170, Warrendale/USA, 1997
- [3] Angenendt, W.; Erke, H.; Hoffmann, G.; Marburger, E.A.; Molt, W.; Zimmermann, G.: Situationsbezogene Sicherheitskriterien im Straßenverkehr, Projektgruppenberichte der BAST, Bereich Unfallforschung, Heft 18, Bergisch Gladbach, 1987
- [4] Bamberg, G.: Statistik. 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 1989
- [5] Bastian, A.; Andreas, P.; Holze, R.; Sochacki, C.; Sánchez, F.; Sala, M.; Freixa, A.: Challenges and Requirements for the Second Generation Adaptive Cruise Control Systems. In Proc.: Vehicle Systems Technology for the Next Century, EAEC, Barcelona/Spanien, 1999
- [6] Beck, W.-D.; Speer, J.: Der aktuelle bundeseinheitliche Verwarnungs- und Bußgeldkatalog mit Erläuterungen. 8. Auflage, ADAC-Verlag, München, 1998
- [7] Benda v., H.: Die Skalierung der Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen; 1. Teil: Ein Klassifikationssystem für Verkehrssituationen aus Fahrersicht, FP 7320 im Auftrag der BAST, TU München, Lehrstuhl für Psychologie, 1977
- [8] Benz, T.: Traffic Flow Effects of Intelligent Cruise Control. Isata-Proc., Paper 93AT061, 1993
- [9] Berz, U.; Dedy, E.; Granich, C.: Haftungsfragen bei dem Einsatz von Telematik-Systemen im Straßenverkehr. DAR (2000) Nr. 12/2000, S. 545-554
- [10] Bielaczek, Chr.: Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr. Dissertation TU Darmstadt, VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 357, Düsseldorf, 1998
- [11] Bill, K.H.: Neue Ansätze zur Untersuchung der Schnittstelle Fahrer/Bremspedal unter realen Fahrbedingungen. In Landau, K. (Hrsg.): Mensch-Maschine-Schnittstellen – Methoden, Ergebnisse und Weiterentwicklungen arbeitswissenschaftlicher Forschungen. IfAO Institut für Arbeitsorganisation, Stuttgart, 1998
- [12] Bleile, T.: Modellierung des Fahrzeugfolgeverhaltens im innerstädtischen Pkw-Verkehr. VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 395, Düsseldorf, 1999
- [13] Bleymüller, J.; Gehlert, G.; Gülicher, H.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. 10. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 1996



- [14] Bokranz, R.; Landau, K.: Einführung in die Arbeitswissenschaft: Analyse und Gestaltung von Arbeitssystemen. Verlag Ulmer, Stuttgart, 1991
- [15] Bosch: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 23. Auflage, Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 1999
- [16] Brackstone, M.; McDonald, M.: Modeling of Motorway Operations. Transportation Research Record (1995), No. 1485, S 56-60
- [17] Braess, H.-H.; Reichart, G.: PROMETHEUS: Vision des „intelligenten Automobils“ auf „intelligenter Straße“? Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 97 (1995), Heft 4+6
- [18] Brannolte, U.; Kraus, Th.: Situationsanalyse über den Stand der Simulationsmodelle im Verkehrswesen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt des BMBF, Förderkennzeichen 19 K 9706 1, Weimar, 1997
- [19] Braun, H.; Ihme, J.: Definitionen kritischer Situationen im Kraftfahrzeugverkehr. Eine Pilotstudie, Automobil-Industrie 3 (1983), S. 367-375
- [20] Breuer, J.J.: Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen. Dissertation TU Darmstadt, VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 271, Düsseldorf, 1996
- [21] Bunker, J.M.; Troutbeck, R.J.: Microscopic Modeling of Traffic Within Freeway Lanes. Transportation Research Record (1995), No. 1510, S. 19-25
- [22] Burckhardt, M.: Abstandsverhalten, Verkehrsfluß und Bußgeldkatalog. Münchner Arbeitskreis für Straßenfahrzeuge e.V., 22. Tagung, München, 1991
- [23] Burckhardt, M.: Das Fahrzeugfolgeproblem. Verkehrsunfall (1980), Vol. 18, S. 265-270
- [24] Burghoff, H.-G.; Daiss, M.; Kühner, T.; Nieuwenhuizen, R.; Schröder, M.: Ein Schritt ins nächste Jahrtausend – Elektrische und elektronische Innovationen. In: Die neue S-Klasse. Sonderausgabe von ATZ und MTZ (1998), Vieweg-Verlag, Wiesbaden, S. 70-83
- [25] Burnham, G.O.; Bekey, G.A.: A Heuristic Finite-State Model of the Human Driver in a Car-Following Situation. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics; Vol. SMC-6 (1976), No. 8, S. 554-562
- [26] Burnham, G.O.; Seo, J.; Bekey, G.A.: Identification of Human Driver Models in Car Following. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-19 (1974), No. 6, S. 911-915
- [27] Büschges, G.; Dilling, J.; Faller, P.; Feger, H.; Pohley, H.-J.; Siegener, W.; Zelinka, F.F.; Zietlow, G.: Systemanalyse Strassenverkehrssicherheit. Bereich Unfallforschung, Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln, 1972

- [28] Chandler, R.E.; Herman, R.; Montroll, E.W.: Traffic Dynamics: Studies in Car Following, Operations Research (1958), March-April, S. 165-184
- [29] Chen, Z.: Menschliche und automatische Regelung der Längsbewegung von Personenkraftwagen. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 168, Düsseldorf, 1992
- [30] Cremer, M.: Der Verkehrsfluß auf Schnellstraßen: Modelle, Überwachung, Regelung. Fachberichte Messen, Steuern, Regeln, Springer-Verlag, Berlin, 1979
- [31] Deering, R.K.; Viano, D.C.: Critical Success Factors for Crash Avoidance Countermeasure Implementation. SAE Paper 94C025, Warrendale/USA, 1994
- [32] Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie 2 (1982), S. 183-190
- [33] Donges, E.: Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1993), Vol. 31, Nr. 9, S. 241-246
- [34] Dorißen, H.T.; Höver, N.: Autonome Intelligente Geschwindigkeitsregelung (AICC) – Ein Beitrag zur Steigerung des Komforts und der aktiven Fahrsicherheit. Automobiltechnische Zeitschrift 98 (1996), Ausg. 7/8, S. 396-405
- [35] Dreyer, W.: Aspekte der Fahrunterstützung im Längs- und Querregelkreis. Universität Braunschweig, VII. IfF-Tagung, Braunschweig, 1989
- [36] Dreyer, W.: Zum längsdynamischen Verhalten des Regelkreises Fahrer-Kraftfahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, 1980
- [37] Eberhard, C.D.; Moffa, P.J.; Swihart, W.R.: Taxonomy and Size Assessments for Forward Impact Crashes Applicable to Forward Collision Warning Systems. SAE Paper 961666, Warrendale/USA, 1996
- [38] Erke, H.; Gstalter, H.: Verkehrskonflikttechnik: Handbuch für die Durchführung und Auswertung von Erhebungen, Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 52, Bergisch Gladbach, 1985
- [39] Fancher, P. ; Ervin, R.; Sayer, J.; Hagan, M.; Bogard, S.; Bareket, Z.; Mefford, M.; Haugen, J.: Intelligent Cruise Control Field Operational Test. Interim Report, University of Michigan, 1997
- [40] Fancher, P.; Ervin, R.; Bogard, S.: A field operational test of adaptive cruise control: System operability in naturalistic use. SAE Paper 980852, Warrendale/USA, 1998
- [41] Färber, B.: Abstandswahrnehmung und Bremsverhalten von Kraftfahrern im fließenden Verkehr. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 32 (1986), Nr. 1, S. 9-13

- [42] Fastenmeier, W.: Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem, in Fastenmeier, W. (Hrsg.): Autofahrer und Verkehrssituation, Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1995
- [43] Fastenmeier, W.; Gstalter, H.; Benda v., H.: Situations- und verhaltensbezogene Kenngrößen zur Sicherheitsbewertung von PROMETHEUS-Maßnahmen, PRO GEN Forschungsbericht, Diagnose & Transfer, München, 1992
- [44] Fastenmeier, W.; Stadler, P.; Lerner, G.: Situationsbezogene Fahrerunterstützung durch AICC, in Fastenmeier, W. (Hrsg.): Autofahrer und Verkehrssituation, Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1995
- [45] Gazis, D.C.; Herman, R.; Rothery, R.W.: Nonlinear Follow-the-Leader Models of Traffic Flow. Operation Research 9 (1961), Nr. 4, S. 545-567
- [46] Germann, S.: Modellbildung und modellgestützte Regelung der Fahrzeuglängsdynamik. VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 309. Düsseldorf, 1997
- [47] Groeben, N.; Sader, M.: Verkehrsdichteindruck und Unfallhäufigkeit. Zeitschrift für Verkehrssicherheit (1968), Nr. 1, S. 35-48
- [48] Haller, R.: Wie erreicht man bei Fahrerassistenz, dass der Fahrer Herr der Situation bleibt? In: Bubb, H.: Ergonomie und Verkehrssicherheit, Herbert Utz Verlag, München, 2000
- [49] Hartwich, E.: Längsdynamik und Folgebewegung des Straßenfahrzeugs und ihr Einfluss auf das Verhalten der Fahrzeugschlange. Dissertation an der Technischen Hochschule Darmstadt, Regelungs- und Datentechnik, 1971
- [50] Hentschel, P.: Straßenverkehrsrecht. Beck'sche Kurzkommentare, Band 5, Verlag C.H. Beck, München, 2001
- [51] Hitz, J.S.; Koziol, J.S.; Lam, A.H.; Inman, V.: Safety Evaluation Results from the Field Operational Test of an Intelligent Cruise Control (ICC) System. SAE Paper 2000-01-1352, Warrendale/USA, 2000
- [52] Hoedemaeker, M.; Andriessen, J.; Wiethoff, M.; Brookhuis, K.: Effects of Driving Style on Headway Preference and Acceptance of an Adaptive Cruise Control (ACC). IATSS Research Vol. 22 (1998), No. 2, S. 29-36
- [53] Hoefs, D.H.: Untersuchung des Fahrverhaltens in Fahrzeugkolonnen. Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 140, Bonn, 1972
- [54] Hörnstein, E.: Möglichkeit/Realisierbarkeit eines Sicherheitsinformationssystems, Berichte der BAST, Mensch und Sicherheit, Heft M 6, Bergisch Gladbach, 1993

- [55] Hoyos, C. Graf; Fastenmeier, W.; Gstalter, H.: Forderungen an eine verhaltensorientierte Verkehrssicherheitsarbeit, in Fastenmeier, W. (Hrsg.): Autofahrer und Verkehrssituation, Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1995
- [56] Iijima, T.; Higashimata, A.; Tange, S.; Mizoguchi, K.; Kamiyama, H.; Iwasaki, K.; Egawa, K.: Development of an Adaptive Cruise Control System with Brake Actuation. SAE Paper 2000-01-1353, Warrendale/USA, 2000
- [57] Isermann, R.; Holzmann, H.; Halfmann, C.: Echtzeitsimulation der Kraftfahrzeugdynamik zur Optimierung von automatischen Abstandsregelsystemen. 2. Symposium Steuerungssysteme für den Antriebsstrang, Berlin, 1999
- [58] Isermann, R.: Identifikation dynamischer Systeme. Band 1+2, Springer-Verlag, Berlin 1988
- [59] Johannsen, G.: Mensch-Maschine-Systeme. Springer-Verlag, Berlin, 1993
- [60] Jurgen, R.K.: Object Detection, Collision Warning and Avoidance Systems. Automotive Electronics Series PT-70, SAE, Warrendale/USA, 1998
- [61] Kaneko, K.; Kai, K.; Akasu, M.: Trial of Target Vehicle Detection by Using Scanning Laser Radar. SAE-Paper 970177, Warrendale/USA, 1997
- [62] Klebelsberg, D.: Verkehrspsychologie. Springer-Verlag, Berlin, 1982
- [63] Knepper, S.: Untersuchung des Geschwindigkeits- und Abstandsverhaltens auf nasser bzw. trockener Fahrbahn unter Berücksichtigung der Lichtverhältnisse sowie der Wochentage. Dissertation an der Universität Karlsruhe, 1992
- [64] König, R.: Dynamische Modellanpassung bei der Verkehrssimulation. VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 294. Düsseldorf, 1996
- [65] König, W.; Weiß, K.E.; Gehrke, H.; Haller, R.: S.A.N.T.O.S. – Situations-angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung. GfA Herbstkonferenz, München, 2000
- [66] Kopf, M.: Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen. VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 203. Düsseldorf, 1994
- [67] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Vieweg-Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1998
- [68] Lages, U.; Timm, K.; Vorwerk, C.; Andreas, P.; Bergholz, R.; Lissel, E.; Weisser, H.: Direct Adaption of the Driver Behaviour on Control Strategies for ACC-Vehicles, including Warning Strategies. In Proc.: Lightweight and small cars – The answer to future needs Vol. I, EAEC, Cernobbio/Italien, 1997
- [69] Lerner, H.D.; Abbott, H.E.; Sleight, R.B.: Following Distance on the Highway Related to Speed, Trip Duration, Traffic, and Illumination. Human Factors (1964), Ausgabe August, S. 343-350

- [70] Leutzbach, W.; Bexelius, S.: Probleme der Kolonnenfahrt. Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau, Schriftenreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 44, Bonn, 1966
- [71] Ludmann, J.; Weilkes, M.: Fahrermodelle als Hilfsmittel für die Entwicklung von ACC-Systemen. Automobiltechnische Zeitschrift 101 (1999), Nr. 5, S. 306-314
- [72] MacAdam, C.; Bareket, Z.; Fancher, P.; Ervin, R.: Using Neural Networks to Identify Driving Style and Headway Control Behaviour of Drivers. Vehicle System Dynamics Supplement 28 (1998), S. 143-160
- [73] Marsden, G.; Brackstone, M.; McDonald, M.: Inter-urban Scenario Assessment of Adaptive Cruise Control. Advanced Driver Assistance Systems, Vol. 13, Paper S653/003/99, 1999
- [74] Matthews, N.D.; An, P.E.; Roberts, J.M.; Harris, C.J.: A Neurofuzzy Approach to Future Intelligent Driver Support Systems. Proc. of the Institution of Mech. Eng., Vol. 212, (1998), Nr. 1, S. 43-58
- [75] Maurel, D.; Parent, M.; Donikian, S.: Influence of ACC in Stop&Go Mode on Traffic Flow. SAE Paper 1999-01-2887, Warrendale/USA, 1999
- [76] Michaels, R.M.: Perceptual Factors in Car following. In: Proceedings 2<sup>nd</sup> International Symposium on the Theory of Traffic Flow, Paris 1963, S. 44-59
- [77] Mitschke, M.; Chen, Z.: Der Fahrer als adaptiver Regler. Hrsg.: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Schriftenreihe Nr. 91, 1991
- [78] Müllner, W.: Abstandsverhalten der Fahrzeuglenker. Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Band 107, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien/Österreich, 2000
- [79] N.N.: Amtliche Unfallstatistik 1999. Statistisches Bundesamt, Fachserie 8, Reihe 7, Wiesbaden, 2000
- [80] N.N.: Straßenverkehrsrecht. 49. Ergänzungslieferung, Verlag C. H. Beck, München, 2000
- [81] Najm, W.G.; daSilva, M.P.; Wiacek, C.J.: Safety Benefits Estimation of an Intelligent Cruise Control System using Field Operational Test Data. SAE Paper 1999-01-2950, Warrendale/USA, 1999
- [82] Nicklisch, F.; Albus, Chr.; Sievert, W.: Aktive Fahrzeugsicherheit. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ 95 (1993), Heft 10
- [83] Okamura, S.; Ogawa, K.; Yano, T.; Nishida, M.: Development of Recognition System for ICC using Sensitive Laser Radar. SAE Paper 2000-01-1306, Warrendale/USA, 2000

- [84] Prestl, W.; Sauer, T.; Steinle, J.; Tschernoster, O.: The BMW Active Cruise Control ACC. SAE Paper 2000-01-0344, Warrendale/USA, 2000
- [85] Rasmussen, J.: Information Processing and Human Machine Interaction. North-Holland Verlag, New York/USA, 1986
- [86] Reichart, G.: Fahrerassistenzsysteme und ihre Auswirkungen auf das Fahrwerk. Tag des Fahrwerks, Institut für Kraftfahrwesen, RWTH Aachen, 1998
- [87] Reichart, G.: Normatives Fahrerverhaltensmodell zur Vorhersage von Unfallhäufigkeiten. In: Bubb, H.: Ergonomie und Verkehrssicherheit, Herbert Utz Verlag, München, 2000
- [88] Reichart, G.; Haller, R.: Mehr aktive Sicherheit durch neue Systeme für Fahrzeug und Straßenverkehr, in Fastenmeier, W. (Hrsg.): Autofahrer und Verkehrssituation, Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1995
- [89] Reiter, U.: Simulation des Verkehrsablaufs mit individuellen Fahrerbeeinflussungssystemen, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1994
- [90] Rohmert, W.: Formen menschlicher Arbeit. In Rohmert, W.; Rutenfranz, J. (Hrsg.): Praktische Arbeitsphysiologie. Thieme, Stuttgart, 1983
- [91] Rohmert, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 38 (1984) 4, S. 193-200
- [92] Sayer, J.R.; Mefford, M.L.; Fancher, P.S.; Ervin, R.E.; Bogard, S.E.: An Experimental Design for Studying how Driver Characteristics influence Headway Control. Proc. of Intelligent Transportation Systems, Boston/USA, 1997
- [93] Schmidtke, H.: Ergonomie. Hanser Verlag, München, 1993
- [94] Schraut, M.; Naab, K.; Bachmann, Th.: BMW's Driver Assistance Concept for Integrated Longitudinal Support. Intelligent Transport Systems World Congress, Paper 2121, Turin/Italien, 2000
- [95] Semsch, M.: Neuartige mechatronische Teilbelagscheibenbremse. XIX. Internationales  $\mu$ -Symposium, VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 419. Düsseldorf, 1999
- [96] Serafin, C.; McLaughlin, S.B.; Farber, E.: ACC Human Factors Issues – Results of Evaluations. In Proc.: FISITA World Automotive Congress, Paris/Frankreich, 1998
- [97] Simonsson, S.O.: Car-Following as a Tool in Road Traffic Simulation. IEEE-IEE Vehicle Navigation and Informations Systems Conference, Ottawa/USA 1993
- [98] Spiegel, B.: Das Automobil – ein ganzheitliches Produkterlebnis. Vortrag anlässlich der Siegerehrung „Die besten Autos 1998“, Auto-Motor-und-Sport, Stuttgart, 1998
- [99] Todosiev, E.P.: The Action Point Model of the Driver-Vehicle System. Ph. D. Dissertation, Ohio State University, 1963

- [100] Tölle, W.: Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten. VDI-Berichte, Reihe 12, Nr. 299. Düsseldorf, 1996
- [101] Uhler, W.: Fahrzeuglängsregelung in ACC-Systemen. Seminar Fahrerassistenzsysteme, Haus der Technik, Essen, 1998
- [102] Venhovens, P.; Naab, K.; Adiprasito, B.: Stop and Go Cruise Control. FISITA World Automotive Congress, Seoul/Korea, 2000
- [103] Weilkes, M.: Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation. Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen mbH, Schriftenreihe Automobiltechnik, Aachen, 2000
- [104] Widmann, G.R.; Daniels, M.K.; Hamilton, L.; Humm, L.; Riley, B.; Schiffmann, J.K.; Schnellker, D.E.; Wishon, W.H.: Comparison of Lidar-Based and Radar-Based Adaptive Cruise Control Systems. SAE Paper 2000-01-0345, Warrendale/USA, 2000
- [105] Wiedemann, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, 1974
- [106] Wilde, G.J.S.: The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health. Risk Analysis 2 (1982), S. 209-225
- [107] Willumeit, H.-P.: Modelle und Modellierungsverfahren in der Fahrzeugdynamik. Teubner Verlag, Stuttgart, 1998
- [108] Willumeit, H.-P.; Jürgensohn, Th.: Fahrermodelle – ein kritischer Überblick. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 99 (1997), Nr. 7/8 + Nr. 9, S. 424-560
- [109] Winner, H.: Adaptive Cruise Control. In: Jurgen, R. (Hrsg.): Automotive Electronics Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition, Mc Graw Hill Inc., 1999
- [110] Winner, H.; Witte, S.; Uhler, W.; Lichtenberg, B.: Adaptive Cruise Control System Aspects and Development Trends. SAE Paper 961010, Warrendale/USA, 1996
- [111] Witte, S.: Simulationsuntersuchungen zum Einfluss von Fahrerverhalten und technischen Abstandsregelsystemen auf den Kolonnenverkehr. Dissertation an der Universität Karlsruhe, 1996